

ЛІТЕРАТУРА



НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНА

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**Тернопільський національний технічний
університет імені Івана Пулюя**

Факультет інженерії машин, споруд та технологій

Кафедра будівельної механіки

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до Практичної роботи № 2

**«Моделювання згинальної залізобетонної
балки методом скінченних елементів»**

**з дисципліни «Метод скінченних елементів в
механіці споруд»**

**для студентів спеціальності 7.06010101 та 8.06010101 «Промислове і
цивільне будівництво»
денної і заочної форми навчання**

Тернопіль – 2016

УДК 69
ББК 38
 М54

Розробники:

Ю. І. Пиндус, канд. техн. наук, доцент
О. П. Конончук, канд. техн. наук, доцент

Рецензент:

М. І. Підгурський, докт. техн. наук, професор

Розглянуто й затверджено на засіданні кафедри будівельної механіки.
Протокол № 8 від 26 квітня 2016 р.

Розглянуто й затверджено на засіданні методичної комісії факультету
інженерії машин, споруд та технологій.
Протокол № 1 від 27 квітня 2016 р.

Методичні вказівки до Практичної роботи №2 «Моделювання згинальної залізобетонної балки методом скінченних елементів» з дисципліни «Метод скінченних елементів в механіці споруд» для студентів спеціальності 7.06010101 та 8.06010101 «Промислове і цивільне будівництво» денної і заочної форми навчання. / Розробники: Ю.І. Пиндус, О.П. Конончук – Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2016. – 47 с.

Складено з урахуванням матеріалів літературних джерел, наведених у переліку.

УДК 69
ББК 38

© Пиндус Ю.І.

© Конончук О.П.

© Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2016

Зміст

Вступ	4
Частина 1. Створення тривимірної моделі згинальної залізобетонної балки	4
1.1 Постановка мети і задач практичної роботи	4
1.2 Завдання та варіанти	5
1.3 Методика моделювання MCE в ANSYS Mechanical APDL	7
Частина 2. Навантаження та оцінювання результатів розрахунку напружено-деформованого стану балки	32
2.1 Навантаження балки	32
2.2 Розрахунок НДС балки	36
2.3 Аналіз результатів розрахунку НДС	38
2.4 Зміст звіту	45
Література	47

Вступ

Методичні вказівки розроблено для проведення Практичної роботи №2 «Моделювання згинальної залізобетонної балки методом скінченних елементів» з курсу: «Метод скінченних елементів в механіці споруд» для студентів спеціальності 7.06010101 та 8.06010101 «Промислове і цивільне будівництво» денної і заочної форми навчання. Методичні вказівки виконані згідно мети та завдань курсу.

Частина 1. Створення тривимірної моделі згинальної залізобетонної балки

1.1 Постановка мети і задач практичної роботи

Зважаючи на світові тенденції до активного застосування комп'ютерного моделювання при проектуванні та експлуатації конструкцій та будівель, вітчизняна будівельна галузь не повинна залишатись осторонь. Застосування методу скінченних елементів при проектуванні нових залізобетонних конструкцій дозволить значно спростити процес та зекономити як час так і кошти на реалізацію поставлених задач.

Метою даної практичної роботи є виконання чисельного моделювання роботи згинальних залізобетонних елементів за дії одноразового навантаження з використанням нелінійних діаграм деформування бетону та внутрішньої сталевих арматур.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі **задачі**:

- з використанням програмного комплексу, який базується на методі скінченних елементів (МСЕ) розробити покрокову методику створення та дослідження нелінійної поведінки повномасштабної залізобетонної балки;
- дослідити напружено-деформований стан (НДС) конструктивних елементів балки при покроковому збільшенні навантаження;
- дослідити НДС арматури та розтріскування бетону в момент втрати несучої здатності балки;
- визначити зусилля армованої залізобетонної балки в момент втрати несучої здатності.

1.2 Завдання та варіанти

Необхідно змодельовати однопролітну залізобетонну балку з наступними вихідними даними.

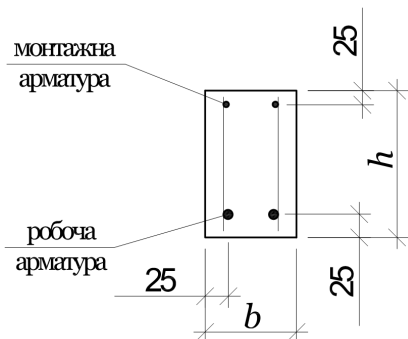
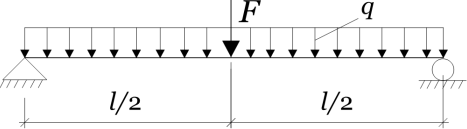
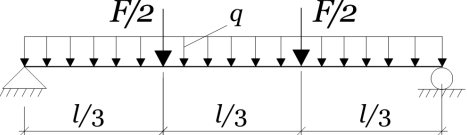


Рис. 1. Поперечний переріз балки, що моделюється
 b – ширина балки; h – висота балки

Таблиця 1. Розрахункова схема балки

Порядковий номер в списку групи	Розрахункова схема
1	2
1, 6, 11, 16, 21	
2, 7, 12, 17, 22	
3, 8, 13, 18, 23	

1	2
4, 9, 14, 19, 24	
5, 10, 15, 20, 25	

Таблиця 2. Геометричні розміри перерізу

Порядковий номер в списку групи	Проліт балки l , м	Розміри поперечного перерізу $b \times h$, мм
1, 2, 3, 4, 5	1,2	80×140
6, 7, 8, 9, 10	1,5	90×160
11, 12, 13, 14, 15	1,8	100×150
16, 17, 18, 19, 20	2,1	100×160
21, 22, 23, 24, 25	2,4	100×180

Таблиця 3. Матеріали балки

Порядковий номер в списку групи	Кількість робочої арматури	Клас робочої арматури	Клас бетону	Наявність монтажної арматури
1	2	3	4	5
1, 7, 13, 19, 25	2 Ø 10	A 400 C ($f_{yd} = 365$ МПа, $E_s = 2,1 \times 10^5$ МПа)	C 16/20 ($f_{cd} = 11,5$ МПа, $f_{ct} = 1,9$ МПа, $E_{cd} = 2,0 \times 10^4$ МПа)	+
5, 6, 12, 18, 24	2 Ø 12	A 400 C ($f_{yd} = 365$ МПа, $E_s = 2,1 \times 10^5$ МПа)	C 25/30 ($f_{cd} = 17$ МПа, $f_{ct} = 2,6$ МПа, $E_{cd} = 2,5 \times 10^4$ МПа)	-

Продовження табл. 3

1	2	3	4	5
4, 10, 11, 17, 23	2 Ø 14	A 240 C ($f_{yd} = 225$ МПа, $E_s = 2,1 \times 10^5$ МПа)	C 30/35 ($f_{cd} = 19,5$ МПа, $f_{ct} = 2,8$ МПа, $E_{cd} = 2,7 \times 10^4$ МПа)	-
3, 9, 15, 16, 22	2 Ø 12	A 500 C ($f_{yd} = 435$ МПа, $E_s = 2,0 \times 10^5$ МПа)	C 20/25 ($f_{cd} = 14,5$ МПа, $f_{ct} = 2,2$ МПа, $E_{cd} = 2,3 \times 10^4$ МПа)	+
2, 8, 14, 20, 21	2 Ø 10	A 500 C ($f_{yd} = 435$ МПа, $E_s = 2,0 \times 10^5$ МПа)	C 12/15 ($f_{cd} = 8,5$ МПа, $f_{ct} = 1,6$ МПа, $E_{cd} = 1,63 \times 10^4$ МПа)	+

Примітки:

- монтажна арматура у всіх випадках проектується Ø 6 A 240C;
- коефіцієнт Пуассона для бетону $\nu = 0,2$;
- коефіцієнт Пуассона для сталі $\nu = 0,3$.

Показники міцності бетону та арматури та всі позначення відповідають:

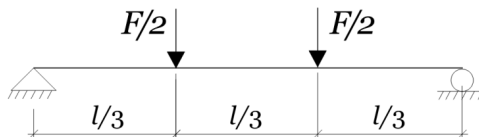
1. ДБН В.2.6-98:2009 Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. – 71 с.

2. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. – Київ: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2010. – 166 с.

1.3 Методика моделювання MCE в ANSYS Mechanical APDL

У якості прикладу розглядається балка:

- розрахункова схема



- геометричні розміри перерізу

Проліт балки l , м	Розміри поперечного перерізу $b \times h$, мм
1	100×160

- матеріал балки

Кількість робочої арматури	Клас робочої арматури	Клас бетону	Наявність монтажноі арматури
2 Ø 10	A 500 C ($f_{yd} = 517,2$ МПа, $E_s = 2,05 \times 10^5$ МПа)	C 20/25 ($f_{cd} = 28$ МПа, $f_{ct} = 2,1$ МПа, $E_{cd} = 2,395 \times 10^4$ МПа)	+

Залізобетонну балку моделюємо з використанням програми ANSYS Mechanical APDL 14.5 в графічному режимі (GUI).

Послідовність створення СЕ моделі:

1. У меню Preferences обираємо тип аналізу – Structural (рис. 2).

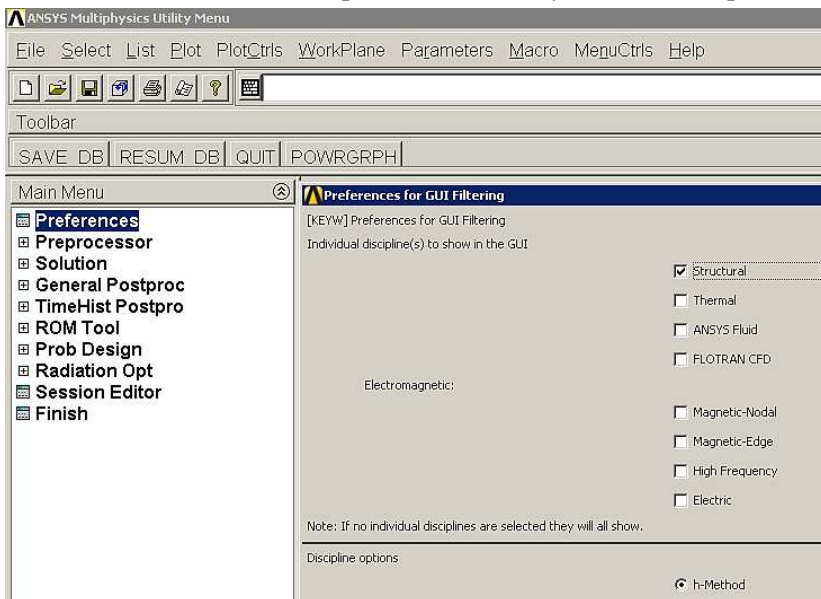


Рис. 2. Вибір типу аналізу

2. Обираємо тип скінченних елементів (SOLID65) для моделювання бетону: Preprocessor – Element Type – Add/Edit/Delete – Add – Solid – concrete65 (рис. 3).

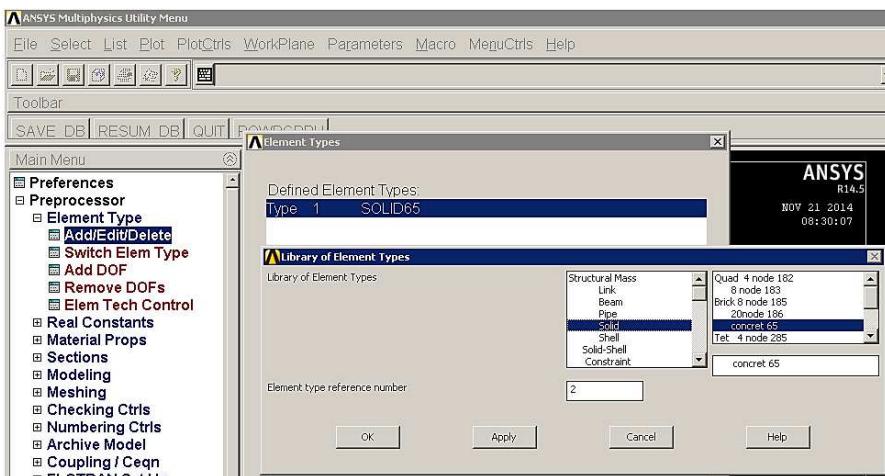


Рис. 3. Вибір скінченних елементів (SOLID65) для моделювання нелінійного бетону

3. Встановлюємо опції (кнопка Options) елемента SOLID65, згідно рис. 4.

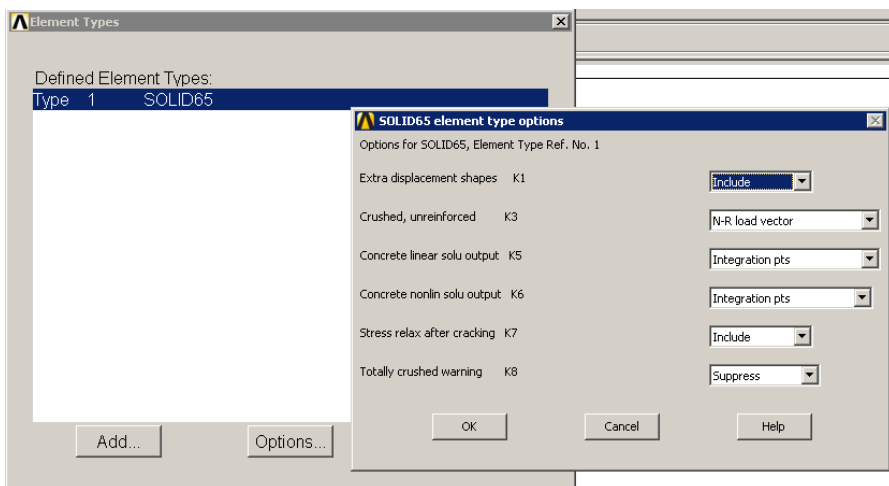


Рис. 4. Встановлення опцій елемента SOLID65

4. Обираємо тип скінченних елементів (BEAM180) для моделювання арматури: Preprocessor – Element Type – Add/Edit/Delete – Add – Beam – 2 node 188 (рис. 5).

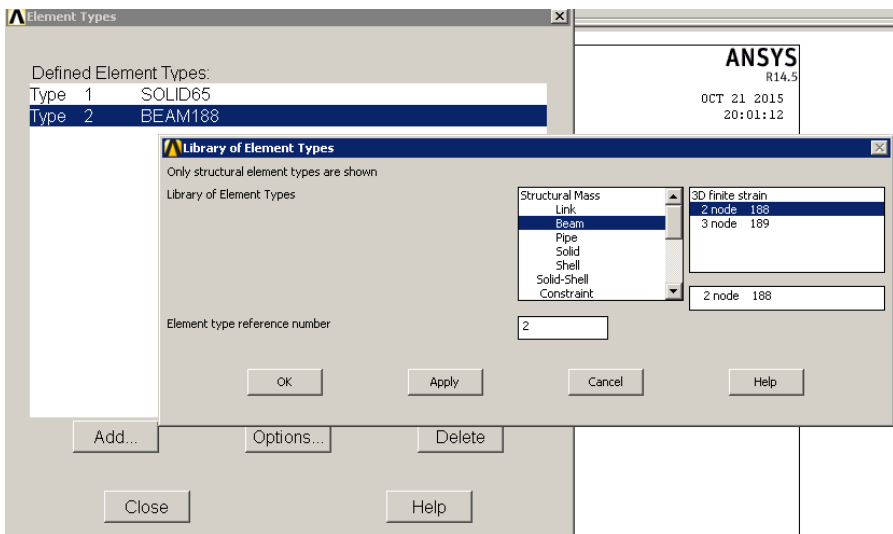


Рис. 5. Вибір типу скінченних елементів (BEAM188) для моделювання арматури

5. Задасмо механічні властивості бетону класу C20/25:

- початковий модуль пружності $E_{cd} = EX = 23950$ МПа та коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,2$ (рис. 6) при стисканні: Preprocessor – Material Props – Material Models – Material Model Number 1 – Structural – Linear – Elastic – Isotropic.

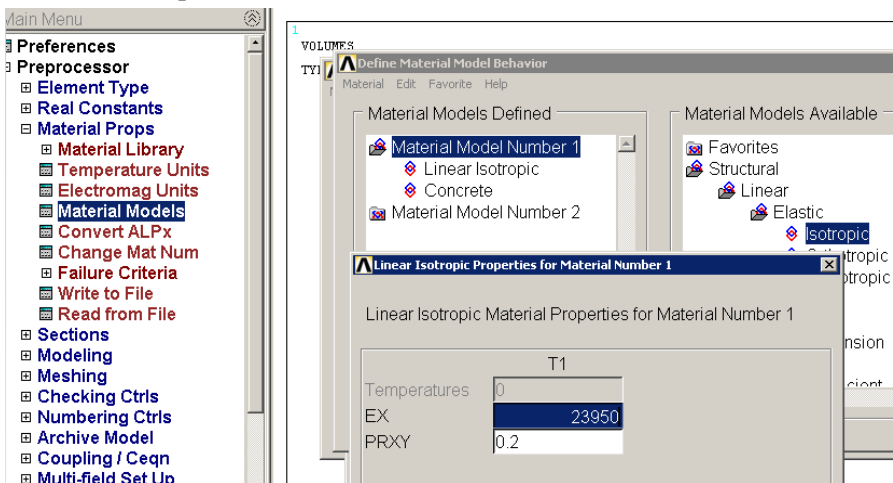


Рис. 6. Задання пружних властивостей бетону при стисканні

- нелінійні властивості бетону при розтріскуванні: Preprocessor – Material Props – Material Models – Material Model Number 1 – Structural – Nonlinear – Inelastic – Non-metal Plasticity – Concrete (рис. 7, табл. 4).

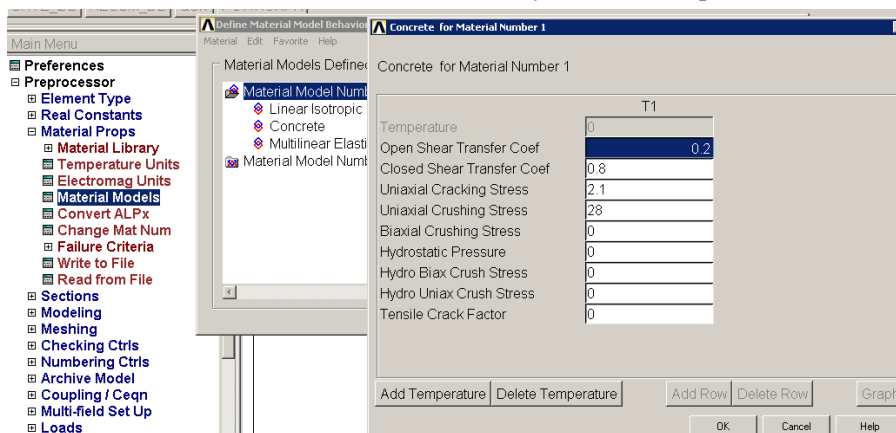


Рис. 7. Нелінійні властивості бетону при розтріскуванні

Таблиця 4. Значення нелінійних параметрів бетону при розтріскуванні

Назва параметрів	Значення
Open shear transfer coefficient (коефіцієнт взаємодії берегів тріщини при її відкритті) (β_t)	0,2 (для всіх варіантів)
Closed shear transfer coefficient (коефіцієнт взаємодії берегів тріщини при її закритті) (β_c)	0.8 (для всіх варіантів)
Uniaxial Cracking Stress (розрахункове значення міцності бетону на розтяг) f_{ct} , МПа	2,1 (згідно варіанту, табл. 3)
Uniaxial Crushing Stress (розрахункове значення міцності бетону на стиск) f_{cd} , МПа	28 (згідно варіанту, табл. 3)

Для моделювання руйнування бетону за стискання у роботі використовується ізотропна полілінійна модель поведінки бетону, яка запропонована Уільямом і Варнке (William & Wranke) [1].

Згідно моделі Уільяма і Варнке нелінійну діаграму деформування бетону за стискання можна побудувати за відомими значеннями механічних властивостей бетону, зокрема:

- значення міцності бетону на стиск (напруження руйнування бетону) f_{cd} ;
- початковий модуль пружності бетону E_{cd} .

Формули, які використовуються для побудови нелінійної діаграми деформування бетону на стиск:

$$f = \frac{E_{cd} \cdot \varepsilon}{1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^2}, \quad (1)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{2 \cdot f_{cd}}{E_{cd}}, \quad (2)$$

$$E_{cd} = \frac{f}{\varepsilon}, \quad (3)$$

де f – напруження за довільної деформації ε ; ε_0 – деформація при напруженні руйнування бетону на стиск f_{cd} .

Розглянемо методику побудови діаграми деформування бетону (рис. 7.1) на прикладі.

Приклад

Вихідні дані міцності бетону (згідно варіанту):

$f_{cd} = 28$ МПа; $E_{cd} = 23950$ МПа.

Точка 1 – початок діграми деформування, при $f = 0$ МПа і $\varepsilon = 0$ мм/мм.

Точка 6 – відповідає значенню критичної деформації бетону $\varepsilon = \varepsilon_0$ (при $f = f_{cd} = 28$ МПа) і визначається за формулою:

$f = f_{cd} = 28$ МПа;

$$\varepsilon = \varepsilon_0 = \frac{2 \cdot f_{cd}}{E_{cd}} = \frac{2 \cdot 28}{23950} = 0,00234 \text{ мм / мм.}$$

Точка 2 – відповідає початковій (30%) ділянці пружності бетону і визначається за формулою:

$f = f_{0,3} = 28 \times 0,3 = 8,4$ МПа;

$$\varepsilon = \varepsilon_0 = \frac{f_{0,3}}{E_{cd}} = \frac{8,4}{23950} = 3,507 E - 4 \text{ мм / мм.}$$

Точки 3, 4, 5 - проміжні точки діаграми, визначаються за формулою (1) при деформаціях 45%, 60%, 80% від критичної ε_0 :

точка 3 - $\varepsilon = 0,45 \times \varepsilon_0 = 0,00105 \text{ мм / мм;}$

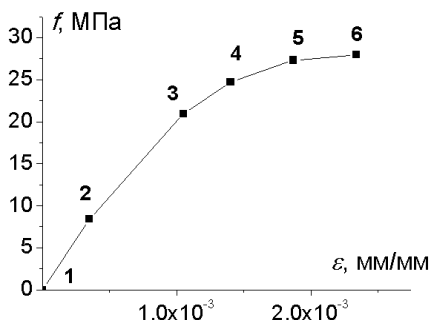
$$f = \frac{E_{cd} \cdot \varepsilon}{1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^2} = \frac{23950 \cdot 0,00105}{1 + \left(\frac{0,00105}{0,00234}\right)^2} = 20,956 \text{ МПа;}$$

точка 4 - $\varepsilon = 0,60 \times \varepsilon_0 = 0,0014 \text{ мм / мм;}$

$$f = \frac{E_{cd} \cdot \varepsilon}{1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^2} = \frac{23950 \cdot 0,0014}{1 + \left(\frac{0,0014}{0,00234}\right)^2} = 24,706 \text{ МПа;}$$

точка 5 - $\varepsilon = 0,80 \times \varepsilon_0 = 0,00187 \text{ мм / мм;}$

$$f = \frac{E_{cd} \cdot \varepsilon}{1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^2} = \frac{23950 \cdot 0,00187}{1 + \left(\frac{0,00187}{0,00234}\right)^2} = 27,317 \text{ МПа};$$



Точки	Деформації ε , мм/мм	Напруження f , МПа
1	0	0
2	3,507E-4	8,4
3	0,00105	20,956
4	0,0014	24,706
5	0,00187	27,317
6	0,00234	28

Рис. 7.1. Полілінійна ізотропна діаграма деформування бетону за умов стиску (згідно моделі Уільяма - Варнке)

- вводимо ізотропну полілінійну діаграму деформування бетону при стисканні (Уільяма - Варнке) (рис. 8): Preprocessor – Material Props – Material Models – Material Model Number 1 – Structural – Nonlinear – Elastic – Multilinear Elastic.

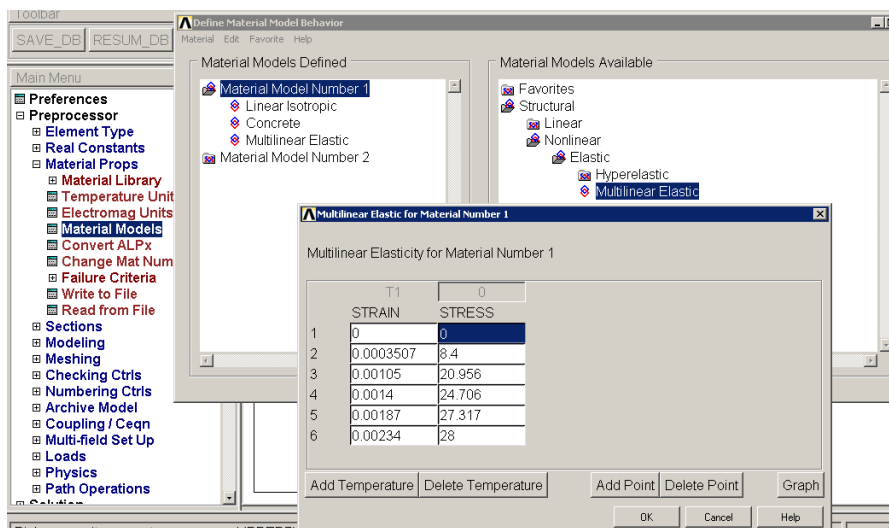


Рис. 8. Введення ізотропної полілінійної діаграми деформування бетону при стисканні (модель Уільяма - Варнке)

6. Задаємо механічні властивості сталі арматури:

- експериментально визначений модуль пружності $E_X = 2,05 \times 10^5$ МПа та коефіцієнт Пуассона $\nu_{PRXY} = 0,3$: Preprocessor – Material Props – Material Models – Material – New Model – Define Material ID 2 – Material Model Number 2 – Structural – Linear – Elastic – Isotropic (рис. 9).

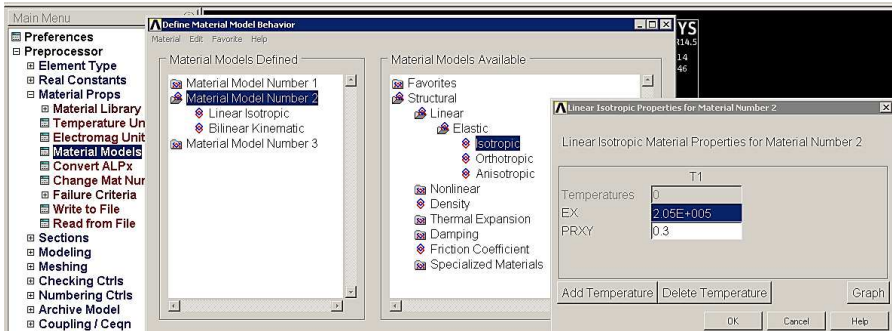


Рис. 9. Лінійні механічні властивості сталі арматури

- білінійну пружно-пластичну діаграму деформування – напруження умовної межі текучості $Yield\ Stss (\sigma_{0,2}) = 517,2$ МПа та коефіцієнт нахилу кривої пластичності $Tang\ Mods = 4000$: Preprocessor – Material Props – Material Models – Material Model Number 2 – Structural – Nonlinear – Inelastic – Rate Independent – Kinematic Hardening – Mises Plasticity - Bilinear (рис. 10, рис. 11).

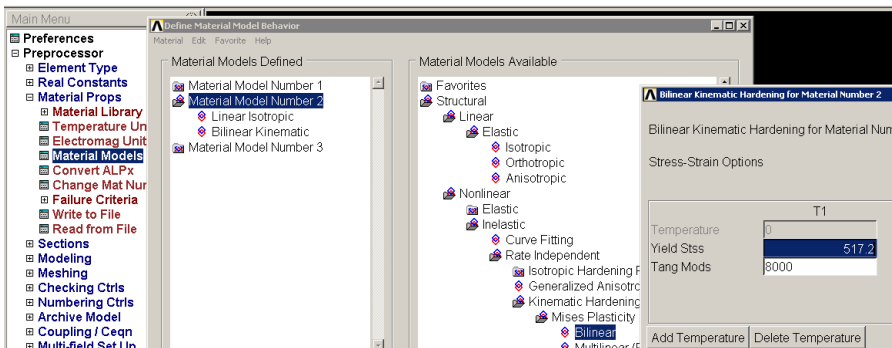


Рис. 10. Нелінійні (білінійне кінематичне зміцнення) механічні властивості матеріалу (сталь) арматури

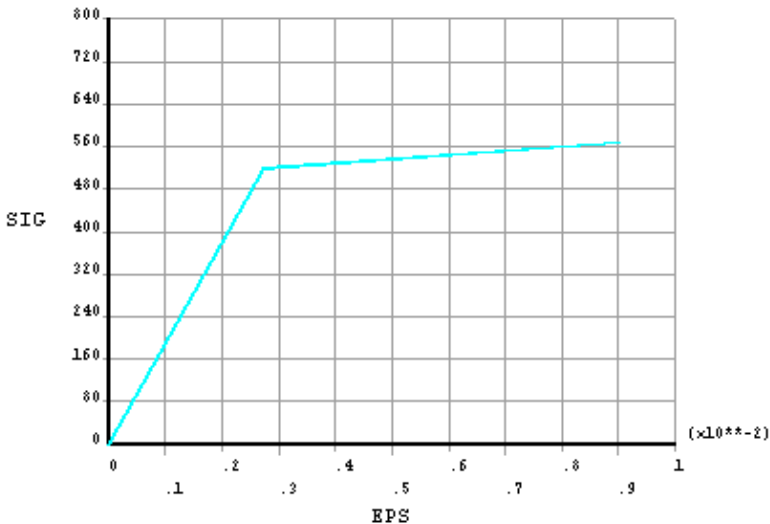


Рис. 11. Пружно-пластична білінійна діаграма деформування матеріалу арматури (білінійне кінематичне зміцнення)

7. Задаємо геометричні параметри перерізу арматури. На рис. 12 подано приклад створення січення з діаметром $\varnothing 10$ мм. У вікні Beam Tool необхідно задати: довільне ім'я "Name", для зручності вписуємо "ten"; тип перерізу "Sub-Type" – обираємо круглий профіль; радіус $R=0,005$ м; значення $N=10$ (розбивка січення на 10 трикутних сегментів) та $T=3$ (розбивка січення на 3 радіальні сегменти) для якісної розбивки січення на скінченні елементи. Після введення даних слід натиснути Apply. Можна переглянути розбиття перерізу на скінченні елементи з використанням кнопки Meshview.

Перерізи арматури інших діаметрів, наприклад ($\varnothing 6$ мм – ID2, Name "six"), створюються аналогічно. Ідентифікаційний номер ID присвоюється автоматично, Name слід вказати: Preprocessor – Section – Beam – Common Sections (рис. 12).

8. Встановлюємо реальні константи Real Constants для бетону (SOLID65) (рис. 13 а, б): Preprocessor – Real Constants – Add/Edit/Delete.

У вікні Real Constants натискаємо "Add", у вікні "Element Type for Real Constants" вибираємо "Type 1 SOLID65" (рис. 13 а), після чого у вікні "Real Constant Set Number for SOLID65" (рис. 13 б) натискаємо "Apply" та "OK".

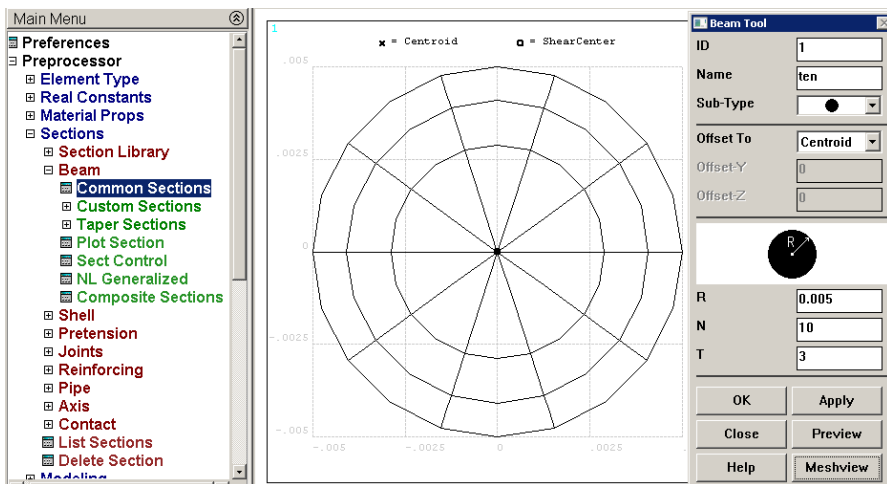
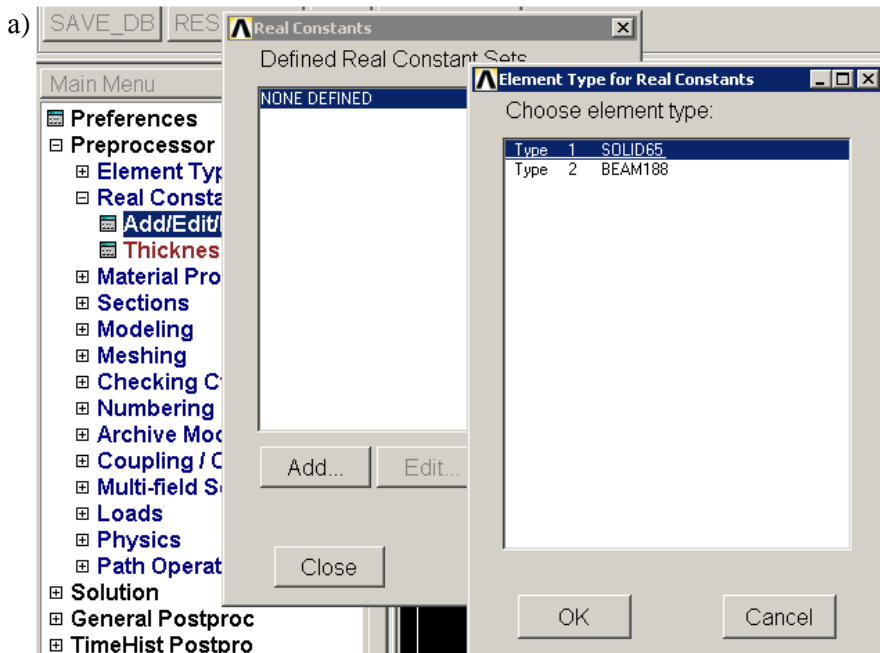


Рис. 12. Встановлення геометричних параметрів січення арматури



б)

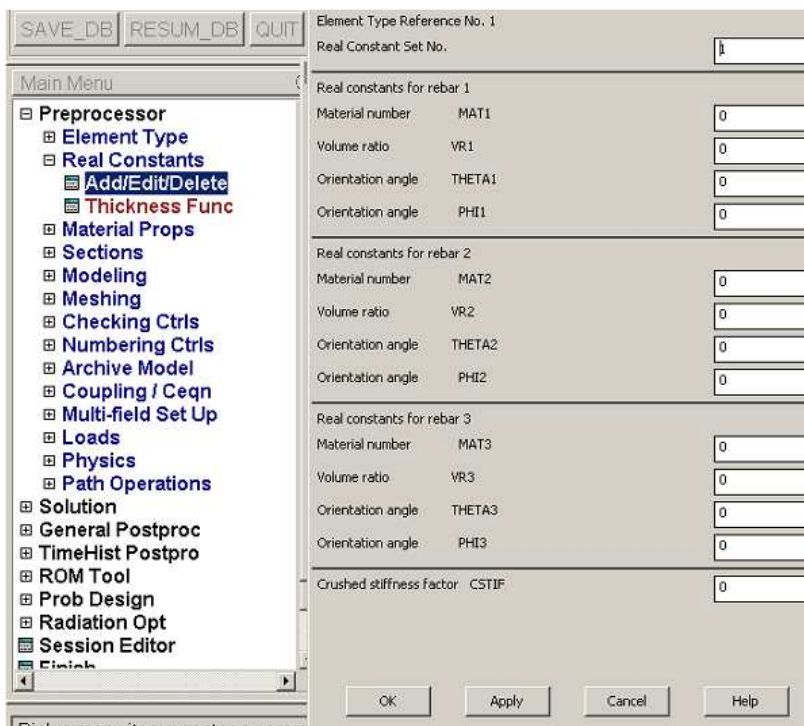


Рис. 13. Встановлення реальних констант для елементів бетону (SOLID65)

9. Створення тривимірної повномасштабної моделі залізобетонної балки. З урахуванням умов симетрії, моделюємо чверть балки:

- створення ключових точок перерізу балки в площині OYZ, з координатами (у метрах, м.):

т.1, $x = 0, y = 0, z = 0$;

т.2, $x = 0, y = 0,16, z = 0$;

т.3, $x = 0, y = 0,16, z = 0,05$;

т.4, $x = 0, y = 0, z = 0,05$.

Увага! Переріз балки повинен бути побудований в площині OYZ, тобто вісь OX повинна лежати вздовж прольоту балки (арматури). У іншому випадку елемент арматури Beam188 буде працювати неправильно і результати будуть недостовірними!

На рис. 14 подано приклад створення точки т.4.: Preprocessor – Modeling – Create – Keypoint – In Active CS.

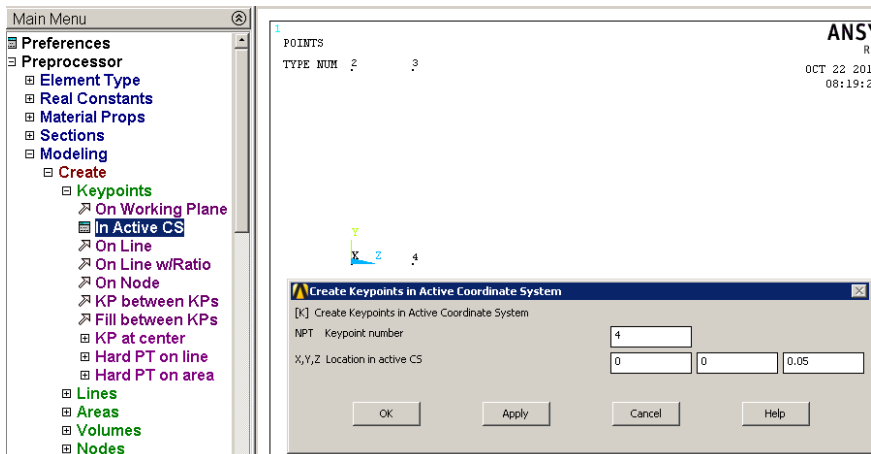


Рис. 14. Створення ключових точок перерізу балки в площині OYZ

- створення площини (торця балки) з ключових точок (рис. 14):
Preprocessor – Modeling – Create – Areas – Arbitrary – Through KPs.

У вікні “Create Area thru KPs” вводимо ключові точки 1, 2, 3, 4 і натискаємо “ОК”. Цю операцію, також, можна виконати шляхом послідовного вибору точок на екрані мишкою.

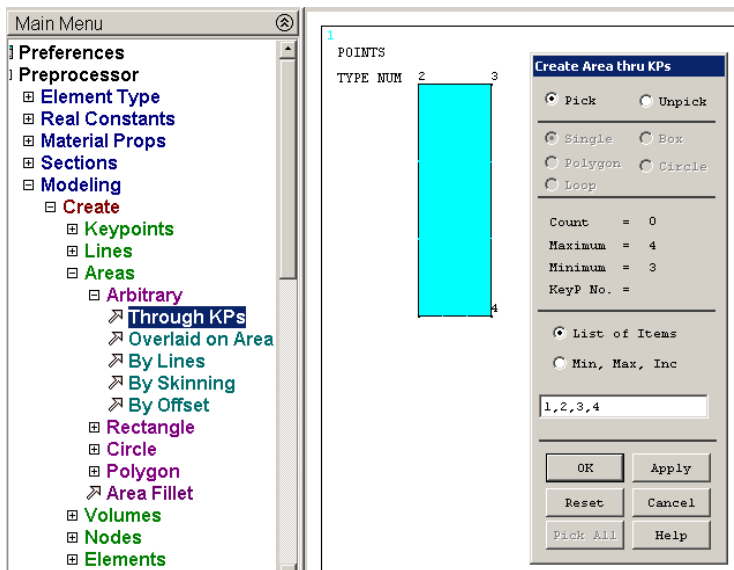
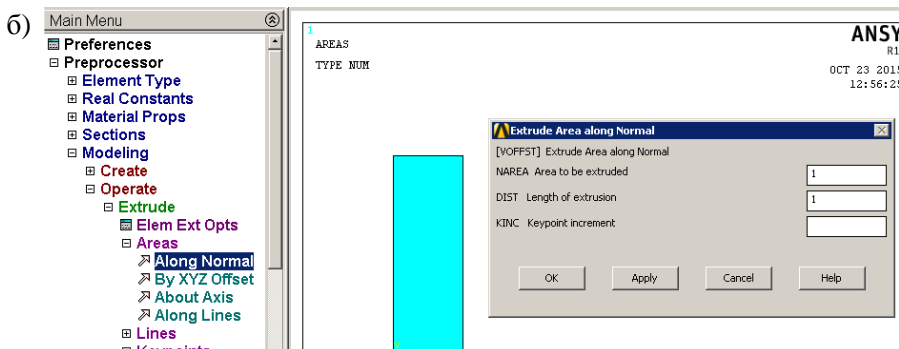
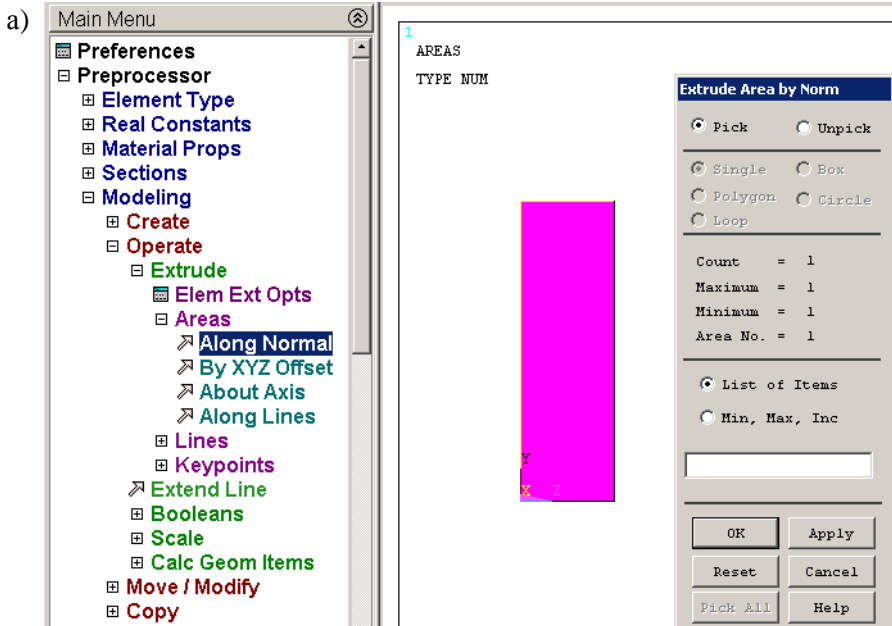


Рис. 15. Створення поверхні перерізу (торця балки) з ключових точок в площині OYZ

- створення об'єму балки шляхом витягування поверхні перерізу вздовж нормалі(осі OX) до OYZ на 1 м (рис. 16 а, б, в): Preprocessor – Modeling – Operate – Extrude – Areas – Along Normal.

При появі вікна “Extrude Area by Normal” мишкою виділяємо площину для витягування (рис. 16 а) і натискаємо «OK».

Потім, у вікні “Extrude Area along Normal” (рис. 16 б) вносимо значення віддалі витягування “Length of extrusion” – 1 м. Після натискання «OK» отримуємо об'єм чверті балки.



В)

TYPE NUM

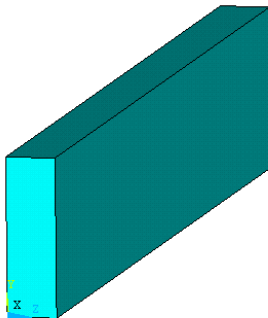


Рис. 16. Створення об'єму балки шляхом її витягування “Extrude” вздовж нормалі (осі OX) до площини OYZ

10. Розбиття об'єму балки на скінченні елементи SOLID65, які призначені для моделювання бетону:

- вибір типу скінченних елементів, матеріалу (рис. 17): Preprocessor – Meshing – Mesh Attributes – Default Attribs.

У вікні “Meshing Attributes” вказуємо: тип скінченного елемента “[Type] Element type number” – 1 SOLID65; порядковий номер матеріалу “Material Number” – 1. Натискаємо «OK».

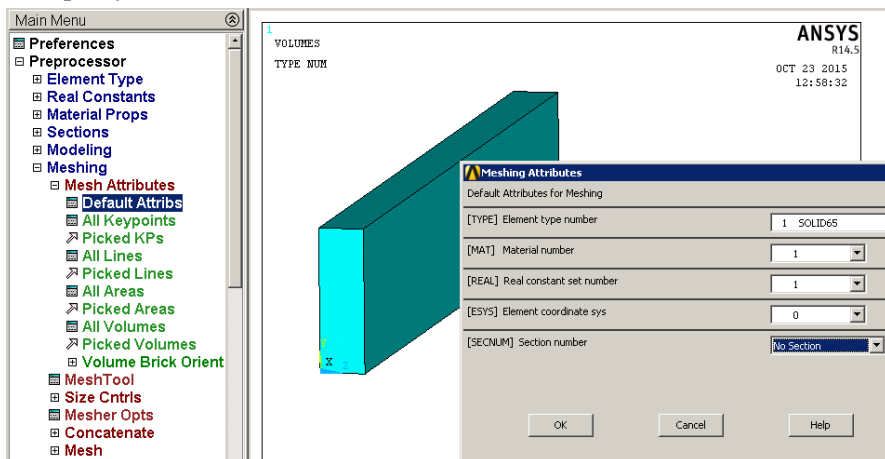


Рис. 17. Вибір типу скінченних елементів та матеріалу бетону

- поділ торцевих граней на відрізки довжиною 0,025 м (рис. 18 а, б)). Після вибору в меню “Picked Lines” (рис. 18 а) та появи вікна

“Element Size on Picked Lines” лівою кнопкою мишки обираємо 8 торцевих граней паралелепіпеда (рис. 18 а) та натискаємо «ОК». Після появи вікна “Element Size on Picked Lines” (рис. 18 б) навпроти “SIZE Element Edge Length” вписуємо 0,025 м та натискаємо «ОК».

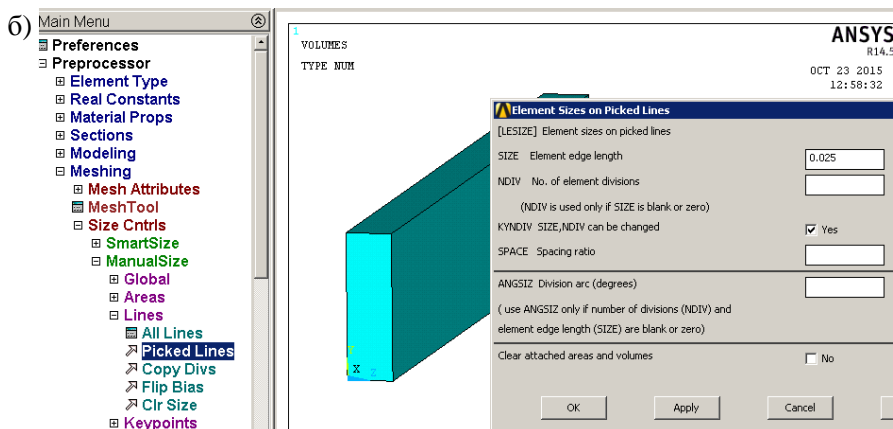
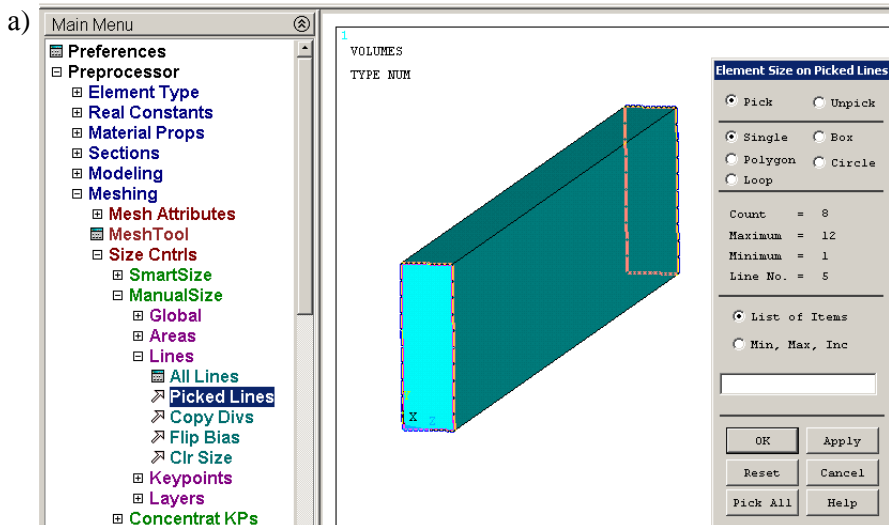


Рис. 18. Поділ торцевих граней на відрізки довжиною 0,025 м

- поділ чотирьох повздовжніх граней на відрізки довжиною 0,05 м. (рис. 19 а, б). Після вибору в меню “Picked Lines” (рис. 19 а) та появи вікна “Element Size on Picked Lines” лівою кнопкою мишки обираємо 4 повздовжні грані паралелепіпеда (рис. 19 а) та натискаємо

«OK». Після появи вікна “Element Size on Picked Lines” (рис. 19 б) навпроти “SIZE Element Edge Length” вписуємо 0,05 м та натискаємо «OK».

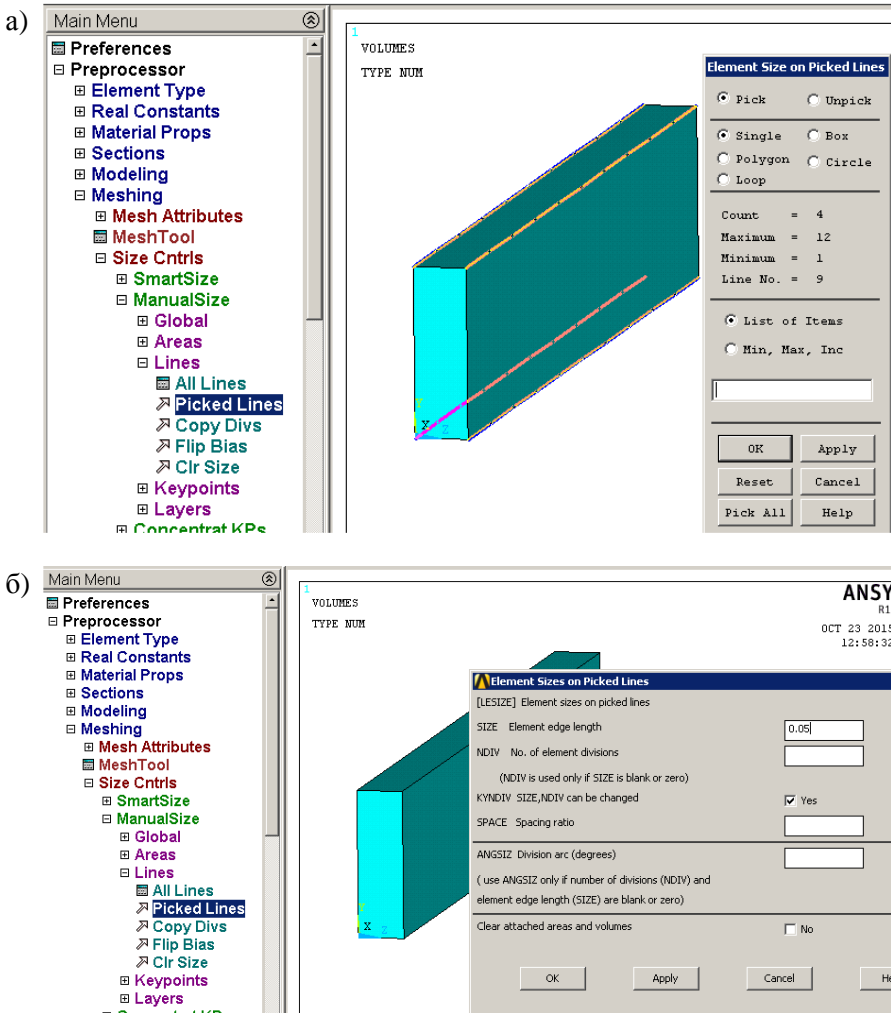


Рис. 19. Поділ чотирьох повздовжніх граней балки на відрізки довжиною 0,05 м

- створення (поділ на регулярні (Mapped) скінченні елементи) моделі балки, яка має механічні властивості бетону: Preprocessor – Meshing – Mesh – Volumes – Mapped – 4 or 6 sided.

Після появи вікна “Mesh Volumes” лівою кнопкою мишки відмічаємо балку і натискаємо «OK» (рис. 20). Отримуємо скінченноелементну повномасштабну модель бетонної балки (рис. 21).

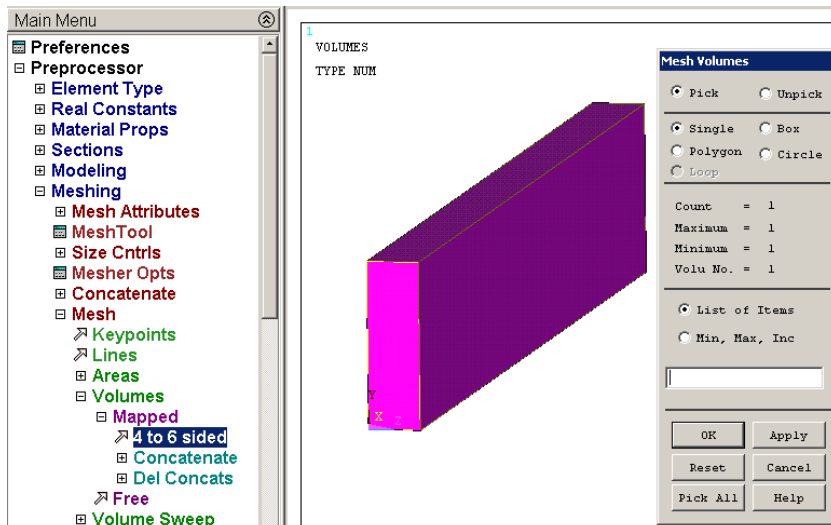


Рис. 20. Створення скінченноелементної моделі бетонної балки

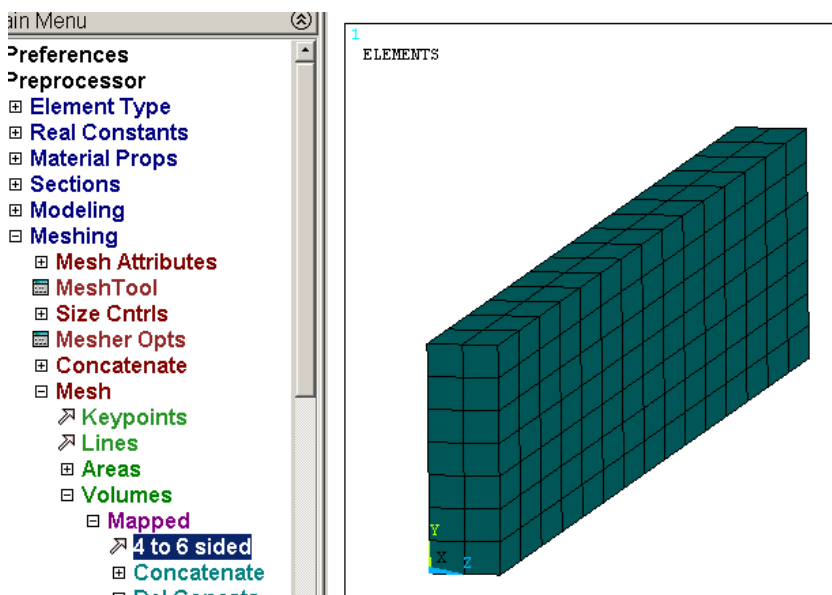


Рис. 21. Скінченноелементна модель бетонної балки

11. Створення арматурних прутків всередині бетонної балки:

- встановлюємо атрибути сталеві арматури, наприклад $\varnothing 10$ мм: Preprocessor – Meshing – Mesh Attributes – Default Attribs.

У вікні Element Attributes (рис. 22) вказуємо: тип скінченного елемента арматури “[TYPE] Element type number” – 2 BEAM 188; номер матеріалу сталі “[MAT] Material type number” – 2; назва профілю арматури $\varnothing 10$ мм “[SECNUM] Section number” – 1 ten.

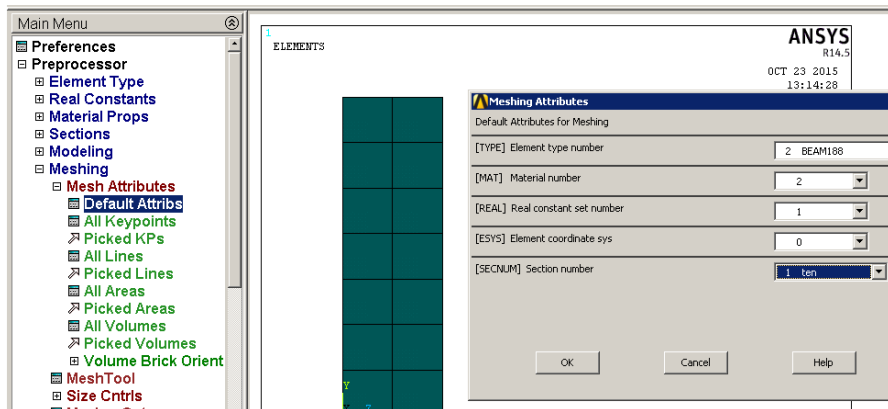


Рис. 22. Встановлення атрибутів арматури $\varnothing 10$ мм

- визначення вузлів для створення арматури $\varnothing 10$ мм: Select – Entities. У вікні “Select Entities” (рис. 23) з випадного списку обираємо “Nodes” – вузли та “By Num/Pick” – за номером чи виділенням. Натискаємо «OK». У вікні “Select Nodes” відмічаємо крапкою навпроти “Box” – виділення рамкою. Виділяємо рамкою ряд вузлів, які розміщені на глибина залягання арматури 0,025 м. Натискаємо «OK».

Цим вузлам потрібно надати геометрію та механічні властивості арматури.

- відображення на екрані виділених у попередньому пункті вузлів (рис. 24): Plot – Nodes.

- створення скінченних елементів арматури з виділених вузлів: Preprocessor – Modeling – Create – Elements – Auto Numbered – Thru Nodes.

Лівою кнопкою мишки, зліва – на право, послідовно з’єднуємо по два сусідні вузли і натискаємо “Apply” (рис. 25 а). Потім наступні і т.д. до об’єднання всіх вузлів (рис. 25 б).

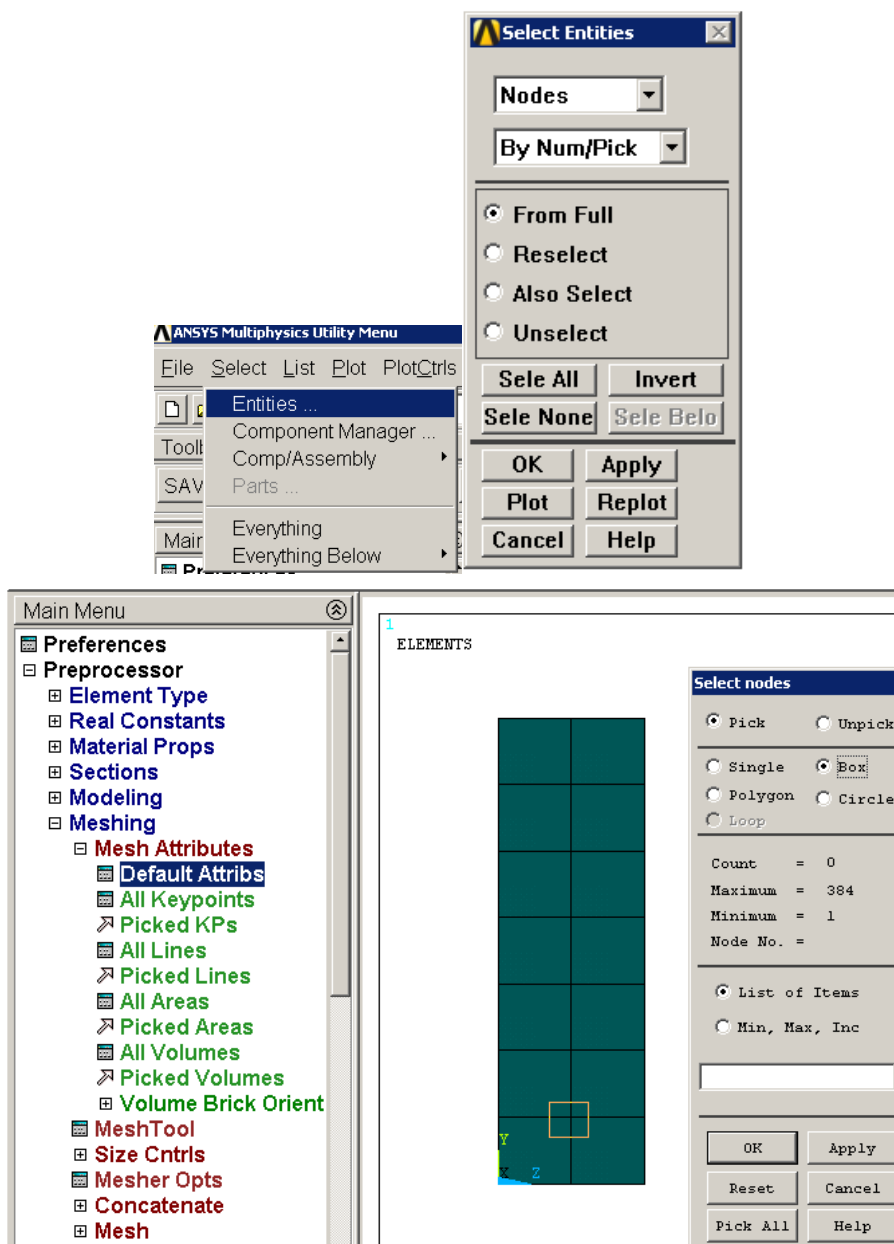


Рис. 23. Виділення вузлів для створення нижньої арматури $\varnothing 10$ мм

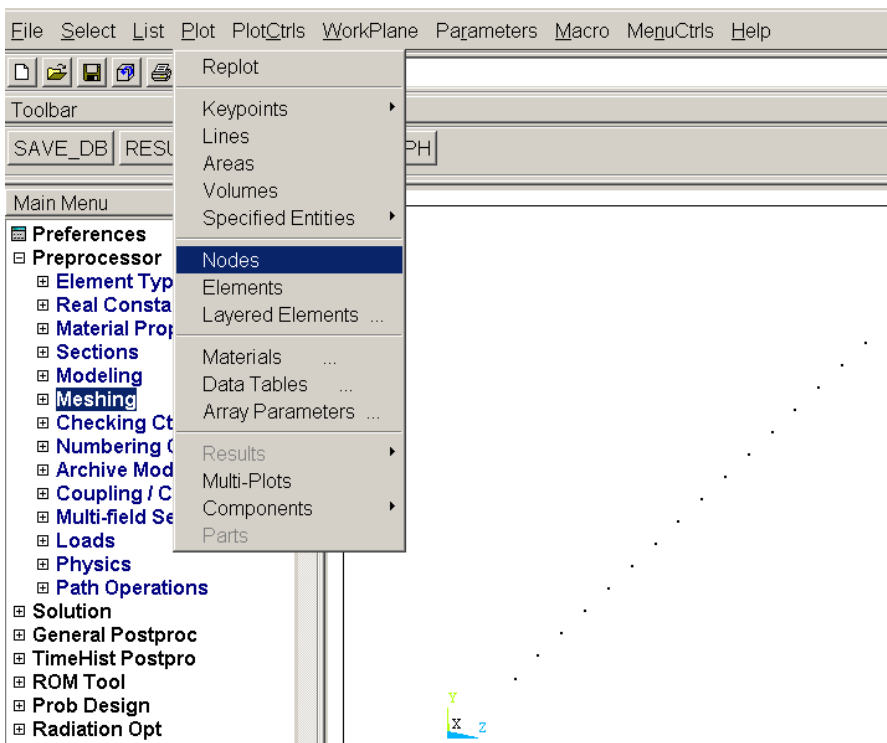
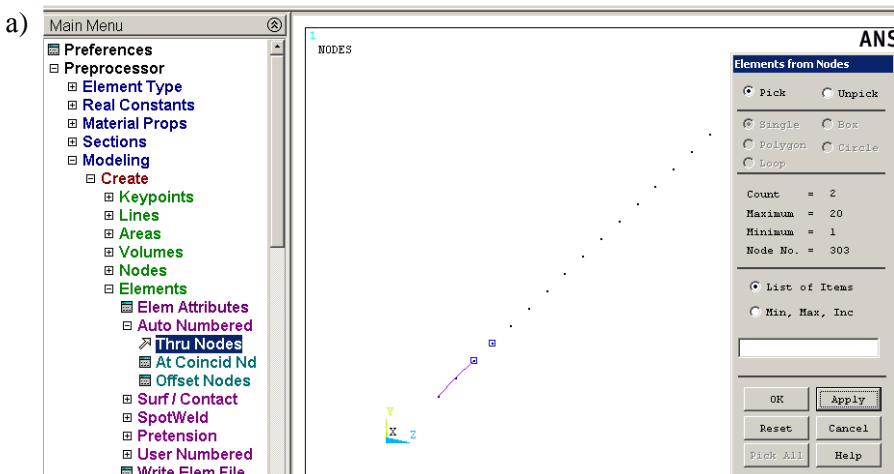


Рис. 24. Відображення виділених вузлів



б)

NODES

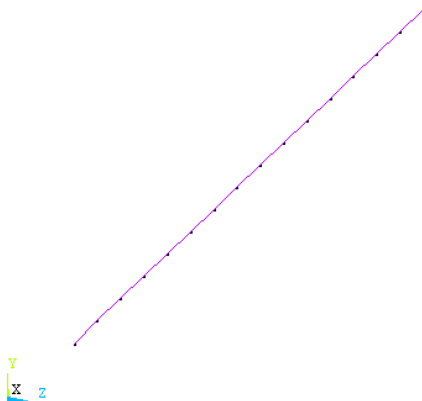


Рис. 25. Створення елементів нижньої арматури $\varnothing 10$ мм

Для того, щоб у подальшому відображався об'ємний профіль створеної арматури потрібно:

- увімкнути опцію [/ESHAPE] Display of element – ☒ On (рис. 26).

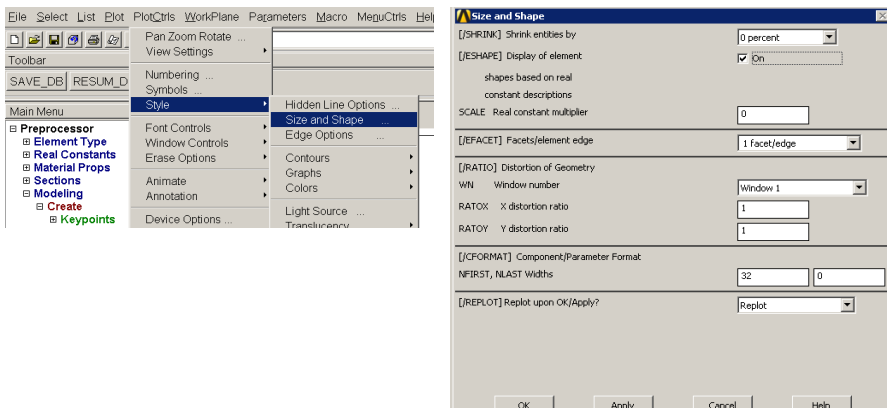


Рис. 26. Вмикання опції перегляду профілю створеного елемента

- виділити усі елементи моделі Select – Everything і вивести їх на екран Plot – Elements (рис. 27).

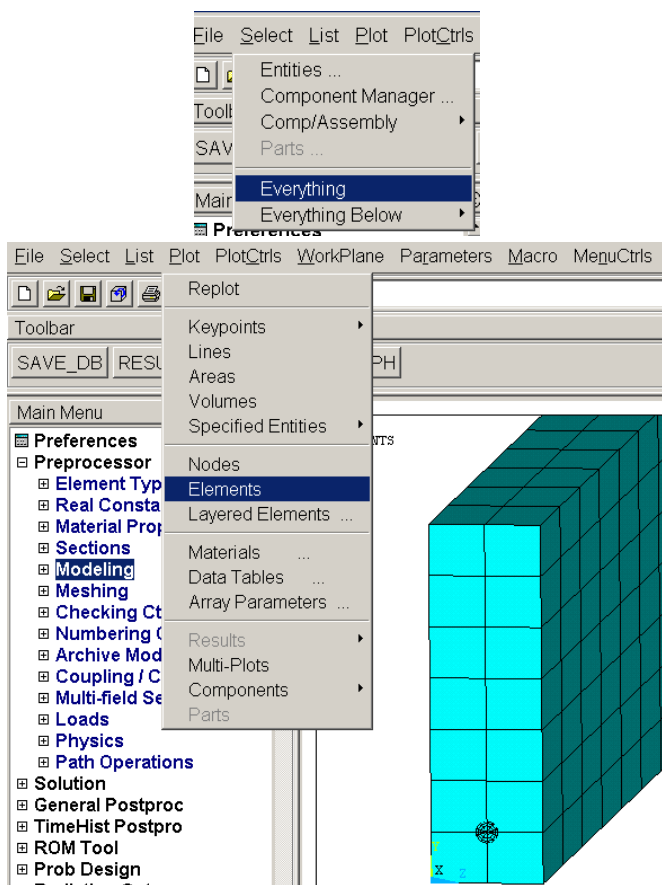


Рис. 27. Відображення елементів залізобетонної балки з арматурою
 $\varnothing 10$ мм

Для візуалізації арматури усередині бетону слід надати елементам бетону прозорості, для чого потрібно:

- виділити скінченні елементи бетону за номером матеріалу (1):
 Select – Entities.

У вікні “Select Entities” з випадних меню обираємо “Elements” та “By Attributes”. Відмічаємо крапкою “Material num” та у комірці “Min,Max,Inc” вписуємо 1 (матеріал бетону) (див. рис. 28). Таким чином програма працюватиме тільки з елементами бетону, інші елементи ігноруватиме. Такі дії, за необхідності, можна здійснювати

при подальшій роботі, для виокремлення тих чи інших елементів моделі – наприклад арматури, та маніпуляцій з ними.

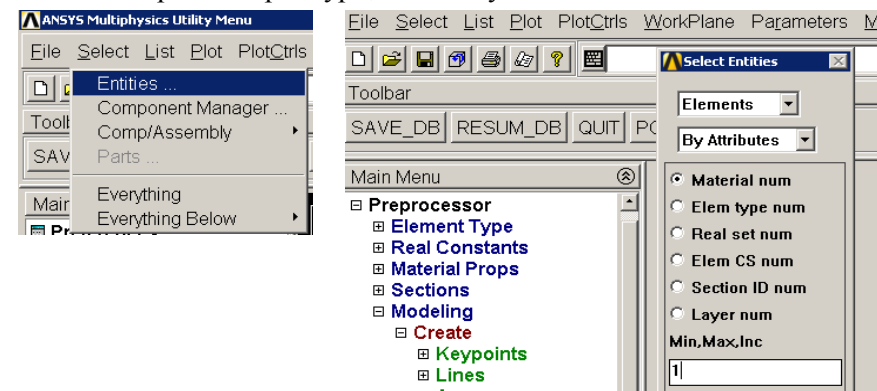


Рис. 28. Вибір елементів бетону за атрибутом матеріалу - Material num

- надання елементам бетону прозорості. Рівень прозорості може приймати значення від 0 до 1: 0 – непрозорий, 1 – прозорий.

PlotCtrls – Style – Translucency – By Value (рис. 29).

У вікні “Translucency” обираємо “Elements” та натискаємо «OK». Після цього у вікні “Translucency” у комірку опції “TLEVEL Translucency level (0-1)” вписуємо 0,8 та натискаємо «OK».

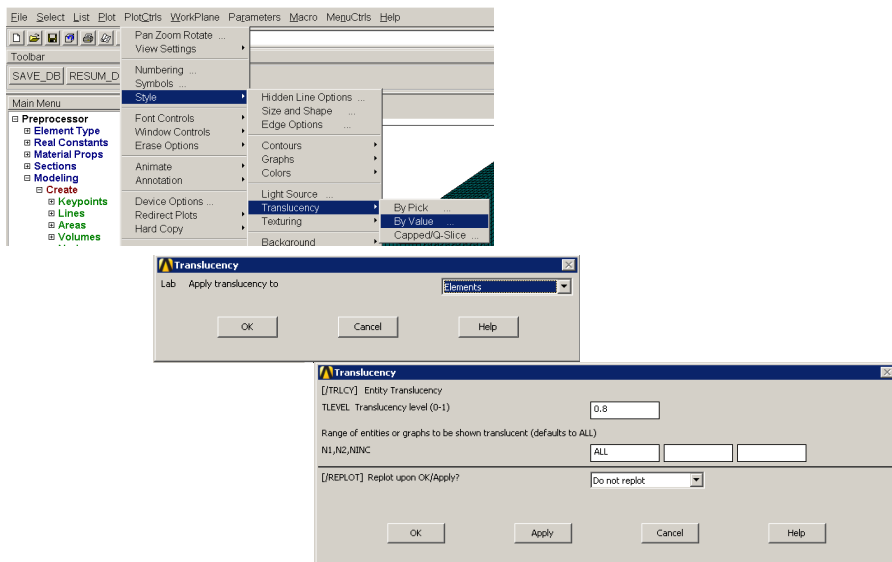


Рис. 29. Надання елементам бетону прозорості Translucency level - 0,8

Для відображення моделі повністю слід знову відмітити всі її елементи Select – Everything (рис. 30 а) та відобразити їх Plot – Elements (рис. 30 б).

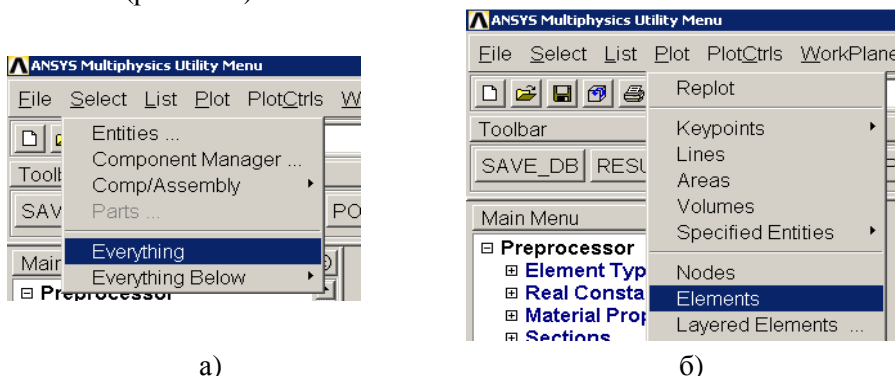


Рис. 30. Відображення всіх елементів моделі

У результаті отримано тривимірну модель залізобетонної балки з нижньою несучою арматурою Ø10 мм (рис. 31).

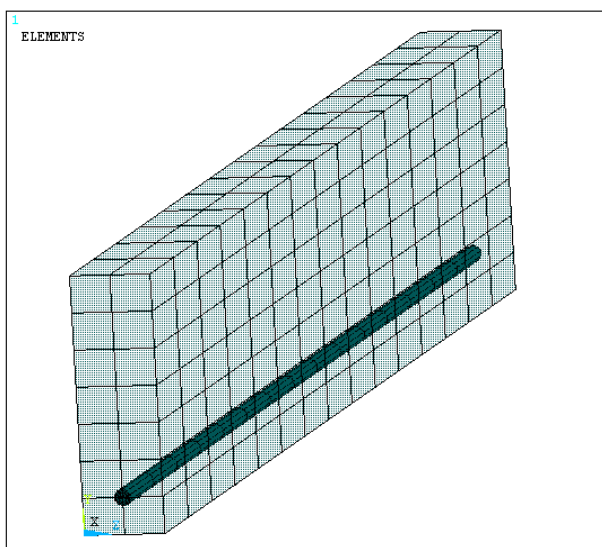


Рис. 31. Тривимірна СЕ модель залізобетонної балки з нижньою несучою арматурою Ø10 мм

Аналогічно створюються верхня (монтажна) арматура Ø6 мм (0,006 м).

Зауваження! При створенні елементів арматури $\varnothing 6$ мм потрібно встановити її атрибути (рис. 32).

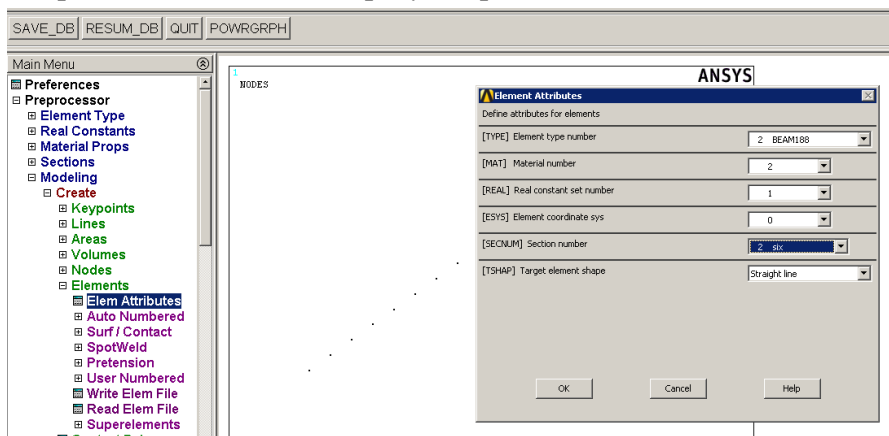


Рис. 32. Встановлення атрибутів перед створенням елементів арматури $\varnothing 6$ мм

Результатом моделювання є тривимірний залізобетонний балка, яка показана на рис. 33.

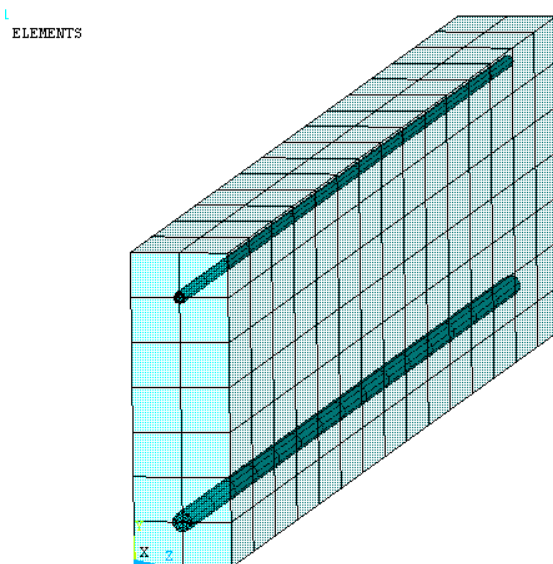


Рис. 33. Симетрична чверть залізобетонної балки

Частина 2. Навантаження та оцінювання результатів розрахунку напружено-деформованого стану балки

2.1 Навантаження балки

- перш за все необхідно задати умови симетрії балки, оскільки моделюється її чверть від експериментальної: Preprocessor – Loads – Define Loads – Apply – Structural – Symmetry – On Areas.

Лівою кнопкою мишки обираємо поверхні (одну бокову і одну торцеву) по яких здійснено умовний симетричний розріз (рис. 34). Натискаємо «OK».

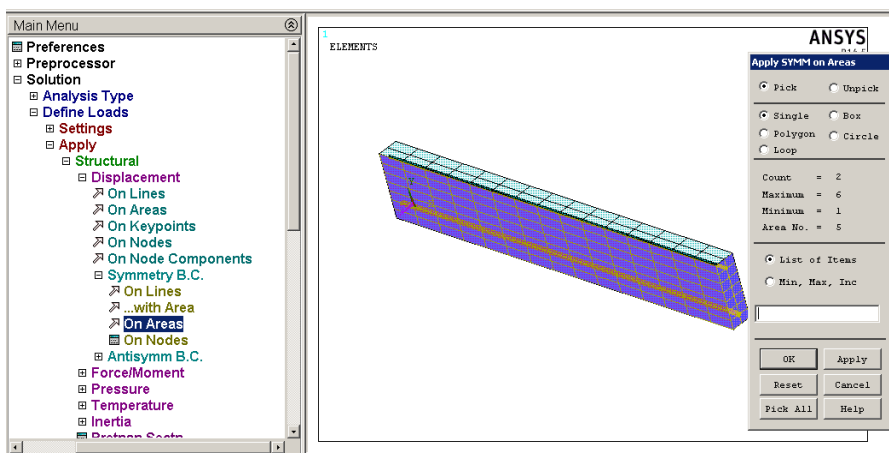


Рис. 34. Вибір симетричних поверхонь моделі

- закріплюємо (обмежуємо переміщення ряд вузлів нижньої опори) (рис. 35). Обираємо мишкою контур “Box” крайнього ряду вузлів нижньої опори, натискаємо «OK» і у вікні “Apply U,ROT on Nodes” відмічаємо UY і UZ та натискаємо «OK». Таким чином, балка зможе переміщуватись лише вздовж повздовжньої осі OX, що відповідає експерименту.

- навантажуюємо верхній ряд вузлів вертикальними зусиллями (по осі OY) (рис. 36): Preprocessor – Loads – Define Loads – Apply – Structural – Force/Moment – On Nodes.

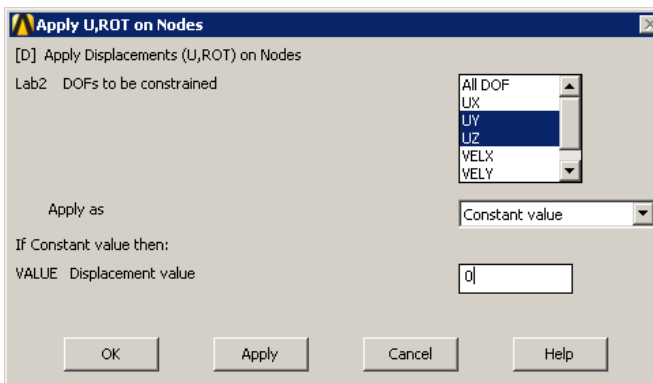
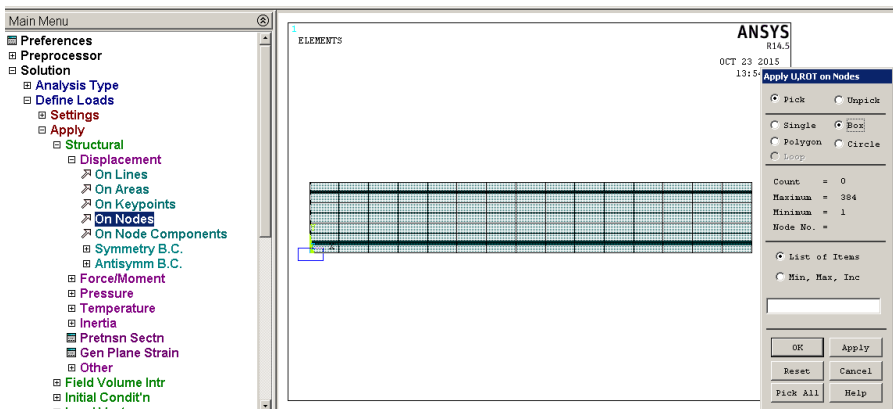


Рис. 35. Закріплення (обмеження у переміщеннях) нижньої опори балки

Обираємо мишкою контур “Box” ряду вузлів (у ряді – 3 вузли) для навантаження зусиллями, натискаємо «OK». У вікні “Apply F/M on Nodes” у комірці навпроти “Lab Direction of force/mom” вибираємо FY – напрям зусилля. У комірку навпроти “VALUE Force/moment value” вдруковуємо величину зусилля на 1 вузол.

Наприклад, якщо на балка навантажена масою 750 кг ($F = 7500\text{H}$), значення зусилля на один вузол становитиме – $F/3 = 7500\text{H} / 3 = 0,0075\text{MN} / 3 = \mathbf{0,0025\text{ MN}}$.

Це зусилля із знаком “-” (напрямок – проти осі OY) потрібно вписати у комірку “VALUE Force/moment value” означає, що зусилля спрямоване вниз – проти осі OY.

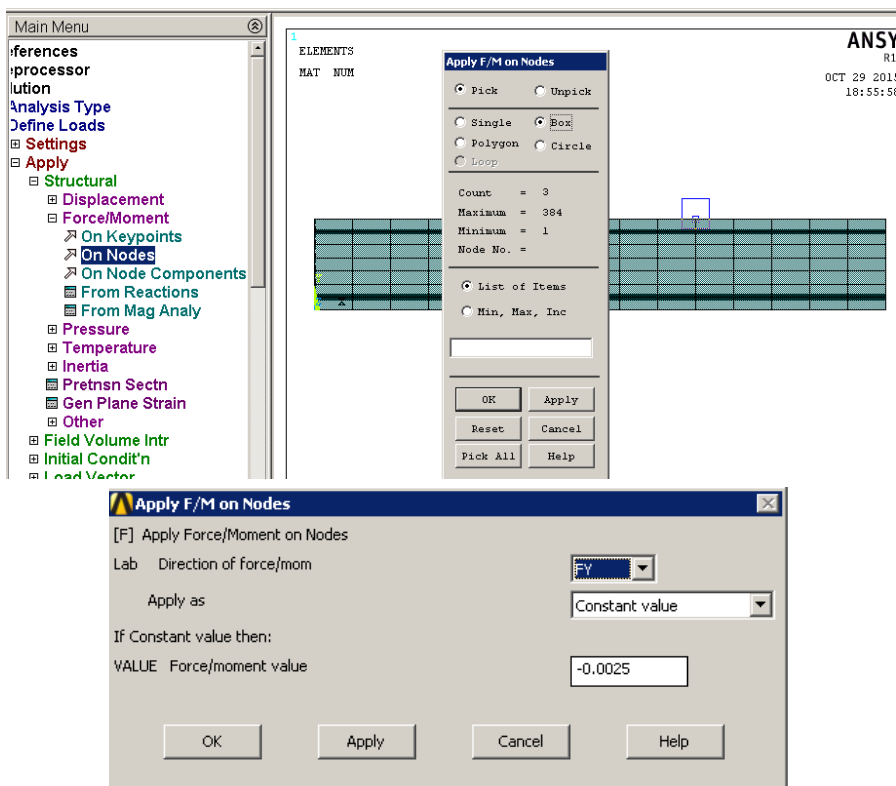


Рис. 36. Навантаження ряду вузлів (3 вузли) зусиллям 0,0025 МН

Якщо, згідно варіанту, балка навантажена тільки рівномірно розподіленим навантаженням, то слід використати навантаження тиском на верхню горизонтальну грань балки.

Для цього, знаходимо площу грані чверті балки:

$$S = \frac{b \cdot l}{4}, \quad (1)$$

де b – ширина балки; l – довжина прольоту.

Знаходимо тиск на верхню горизонтальну грань:

$$P = \frac{F}{S}. \quad (2)$$

Наприклад, якщо $b = 0,1$ м, $l = 2$ м і зусилля $F = 7500$ Н, отримаємо тиск:

$$P = 150000 \text{ Па} = \mathbf{0,15 \text{ МПа}}.$$

Навантаження тиском на верхню грань балки слід прикладати у

мегапаскалях. Для цього використаємо команду: Preprocessor – Loads – Define Loads – Apply – Structural – Pressure – On Areas.

Мишкою слід вказати поверхню навантаження (рис. 37 а) та у вікні (рис. 37 б) у комірку Load PRES value вдрукувати значення тиску, у даному прикладі 0,15 МПа.

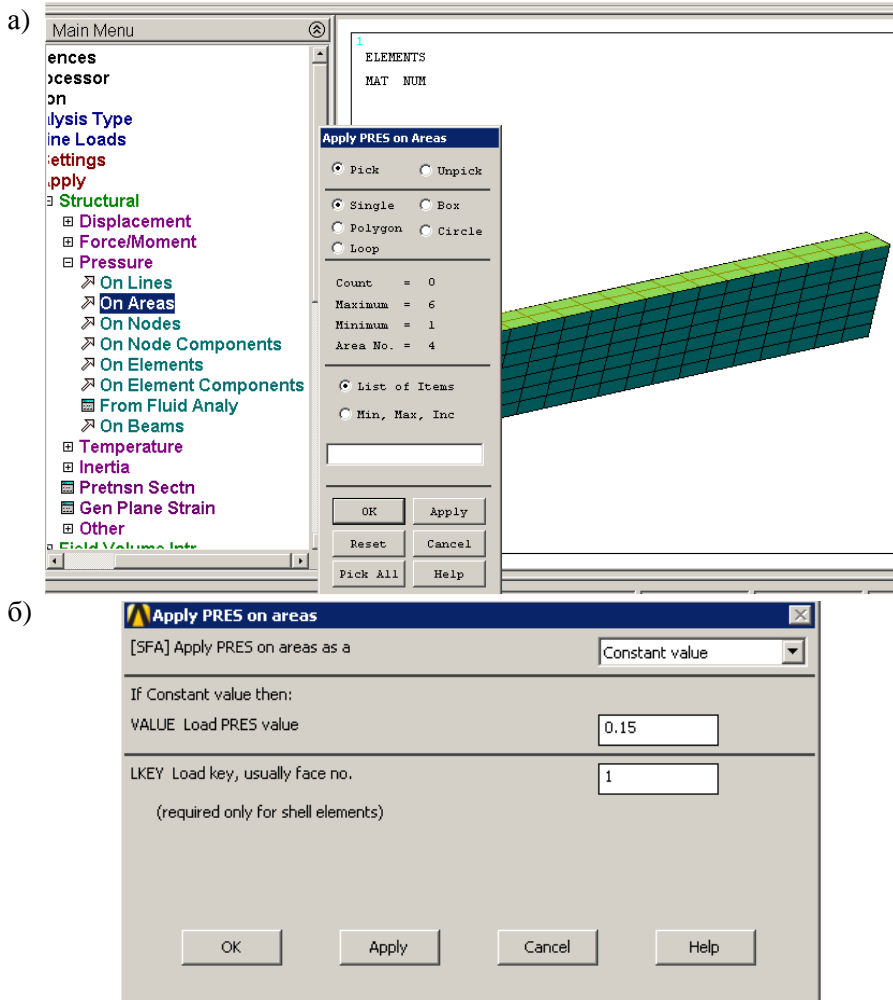


Рис. 37. Виділення поверхні та навантаження тиском 0,15 МПа

Якщо варіант завдання передбачає обидва типи навантаження (зосереджене і розподілене) то слід застосувати обидва (вище описані)

способи прикладання навантажень до балки, попередньо розділивши загальне навантаження на два. Половину навантаження прикласти як зосереджене іншу половину – як розподілене.

2.2 Розрахунок НДС балки

Після прикладання зусиль, модель готова для початку розрахунку.

Поставлена задача вимагає розділу розрахунку на підкроки, для отримання проміжних результатів обчислення НДС.

Для того, щоб розділити навантаження на підкроки застосуємо команду: Solution – Analysis Type – Sol'n Controls.

У вікні Solution Controls (рис. 38) вказуємо:

- час кінця кроку – Time at end of loadstep – 1;
- кількість підкроків – Number of substeps – 20;
- максимальна кількість підкроків – Max no. of substeps – 50;
- мінімальна кількість підкроків – Min no. of substeps – 20.

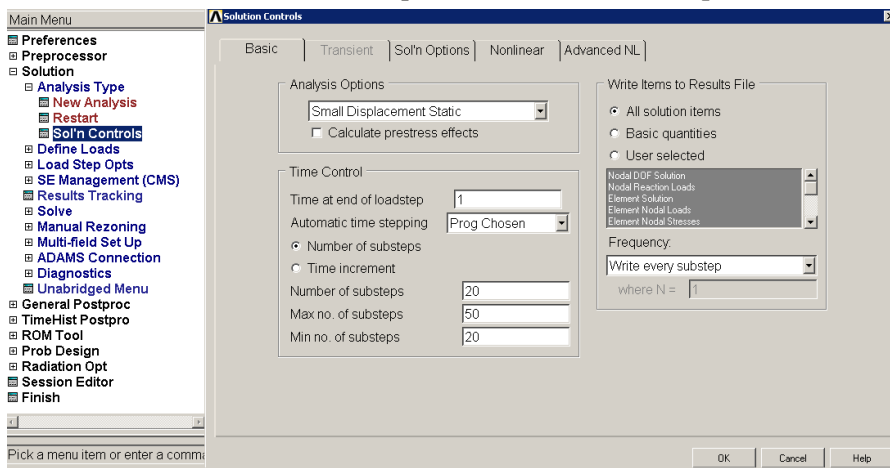


Рис. 38. Розділ кроку навантаження на 20 підкроків

Зауваження! Кількість підкроків може відрізнятись у кожному варіанті. У деяких випадках, наприклад при перевищенні навантаження на балку, кількість підкроків потрібно збільшувати, або зменшувати навантаження.

Для початку розрахунку використовуємо команду: Solution – Solve – Current LS.

Для зручності, вікно /STATUS Command потрібно закрити перед натисканням на ОК у вікні Solve Current Load Step.

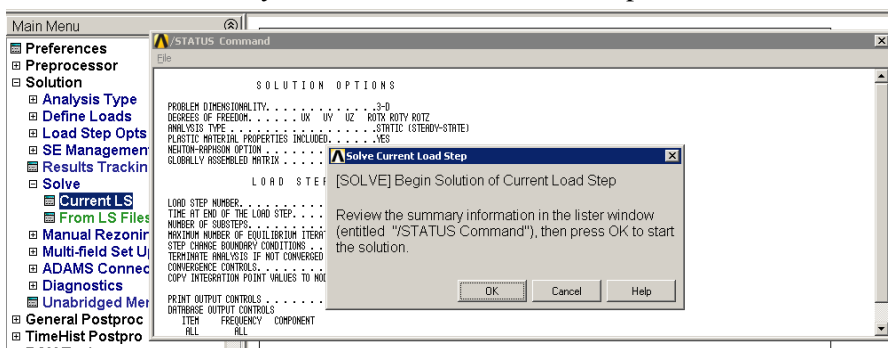


Рис. 39. Команда початку розрахунку

Після початку розрахунку на екрані з'явиться вікно (рис. 39), у якому буде виводитись інформація про збіжність розрахунку за автоматично встановленими критеріями. Якщо розрахунок повністю завершений, то значення Time буде рівним "1".

Можливо, що розрахунок не відбудеться до кінця кроку (немає збіжності за встановленими критеріями), тобто навантаження не досягне свого максимуму (рис. 40) Time = 0.87.

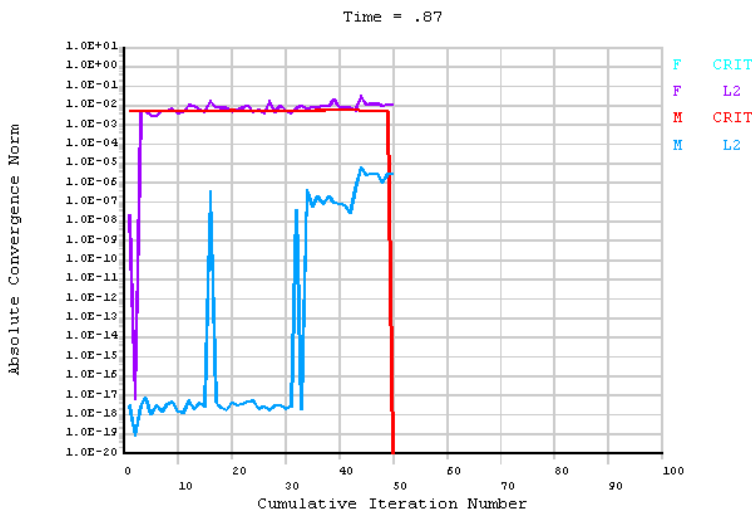


Рис. 40. Вікно збіжності розрахунку

На це може бути декілька основних причин:

- незначне перевищення максимального навантаження кроку. У цьому випадку розрахунок досягне підкроку навантаження після якого настає руйнування конструкції (рис. 40). Якщо руйнування відбувається на початкових підкроках, то необхідно зменшити максимальне навантаження. Якщо на останніх підкроках, то результати обчислень можна використовувати для побудови кривих НДС (прогину, розподілу напружень та деформацій елементів конструкції), оскільки результати попередніх підкроків будуть записані на жорсткий диск ПК;
- недостовірні чи помилкові дані властивостей матеріалів конструкції. У цьому випадку незбіжність відбудеться на початкових підкроках розрахунку. Слід перевірити та виправити неточності механічних властивостей матеріалів;
- помилкове закріплення та навантаження моделі. У цьому випадку програма вкаже на помилку на початку розрахунку. Слід виконати правильне закріплення та навантаження моделі, згідно варіанту;
- інше.

Варто зауважити, що при малих значеннях максимального навантаження розрахунок завершиться до настання руйнування конструкції. У цьому випадку неможливо виконати аналіз НДС конструкції в момент втрати її несучої здатності.

2.3 Аналіз результатів розрахунку НДС

Після завершення розрахунку можна скористатись модулем перегляду результатів обчислень (рис. 41).

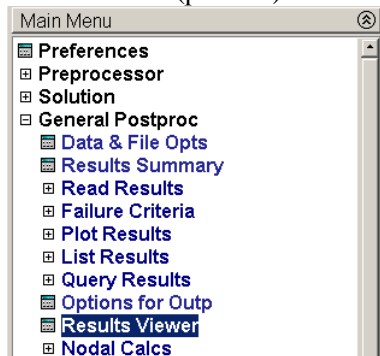



Рис. 41. Виклик модуля перегляду результатів

Для виведення результатів переміщення (прогину) балки слід скористатись командою меню (рис. 42): Nodal Solution – DOF Solution – Y – Component of displacement, і натиснути кнопку .

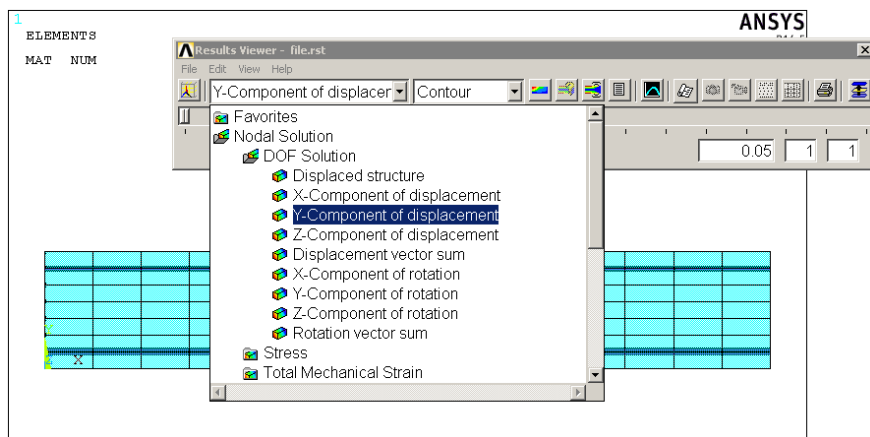


Рис. 42. Вибір результатів розрахунку переміщень елементів моделі у напрямку осі OY

У результаті отримаємо розподіл поля переміщень балки після першого підкроку навантаження (рис. 43). Значення та локалізація максимальних переміщень (прогину) балки також подано на рис. 43.

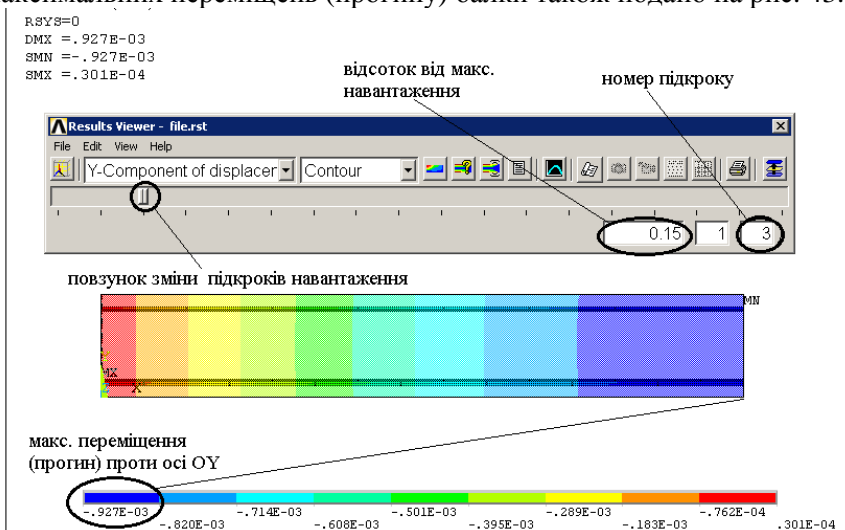


Рис. 43. Результати розрахунку поля переміщень балки після третього підкроку навантаження (15% від максимального)

Результати переміщень елементів балки на наступних підкроках навантаження можна отримати переміщуючи повзунок (рис. 43).

Для побудови кривої прогину балки у залежності від навантаження слід використати адаптовані для цього програми, зокрема Excel або Microcal Origin. На рис. 44 подано результати залежності прогину балки від прикладеного зусилля. Для отримання значень зусилля (стовбець C(Y) рис. 44) кожного підкроку потрібно відсоток підкроку (% від максимального зусилля стовбець B(Y)) помножити на максимальне зусилля циклу (у даному випадку 7500 Н).

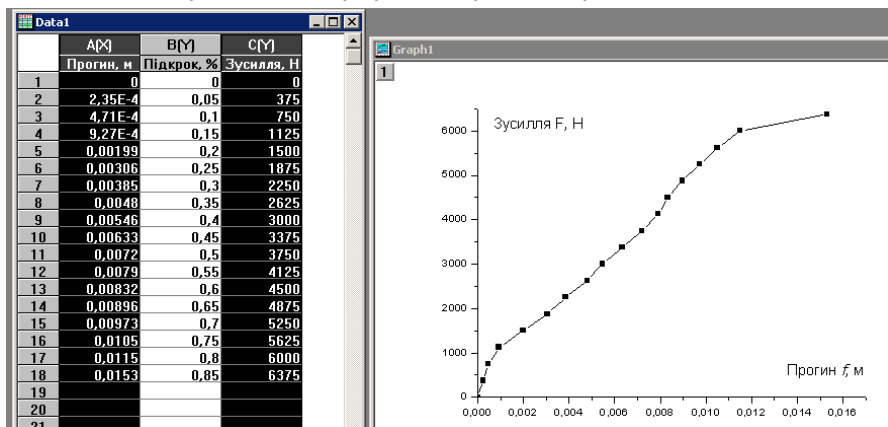


Рис. 44. Побудова кривої прогину балки у залежності від прикладеного до неї зусилля

На кривій прогину балки у залежності від прикладеного до неї зусилля (рис. 45) можна виділити три ділянки:

- 1) лінійна ділянка до початку розтріскування, яка завершується загином кривої, що свідчить про початок розтріскування бетону;
- 2) робоча лінійна ділянка роботи балки з тріщинами;
- 3) нелінійна ділянка втрати балкою несучої здатності. Цій ділянці характерне розтріскування верхньої стисненої фібри бетону та досягнення робочою арматурою межі текучості.

Аналогічним чином, обираючи необхідні параметри (рис. 42), можна покроково виводити на екран результати розрахунку нормальних напружень (stress) та деформацій (strain) бетону чи арматури.

Для аналізу НДС арматури слід застосувати виділення та вивід на екран лише стержнів арматури за номером матеріалу Material Num – 2. Для цього використовується команда (рис. 46): Select – Entities.

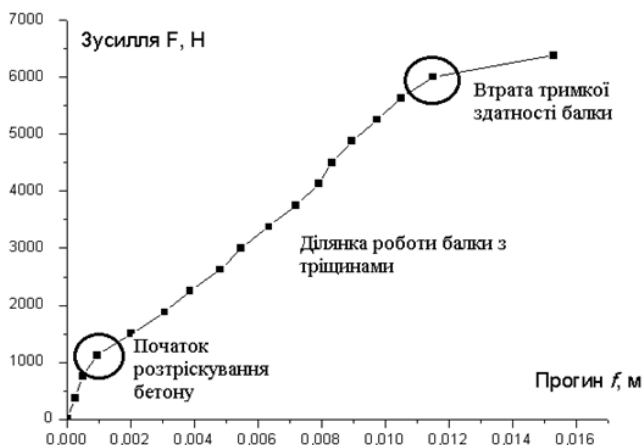


Рис. 45. Результати розрахунку прогину балки у залежності від прикладеного до неї зусилля

У вікні Select Entities обираємо Elements, By Attributes, навпроти Material num ставимо відмітку і у комірці Max,Min,Inc вдруковуємо номер матеріалу – 2. У результаті цих дій на екрані відобразяться лише стержні арматури (рис. 46). Матеріал бетону програма ігноруватиме.

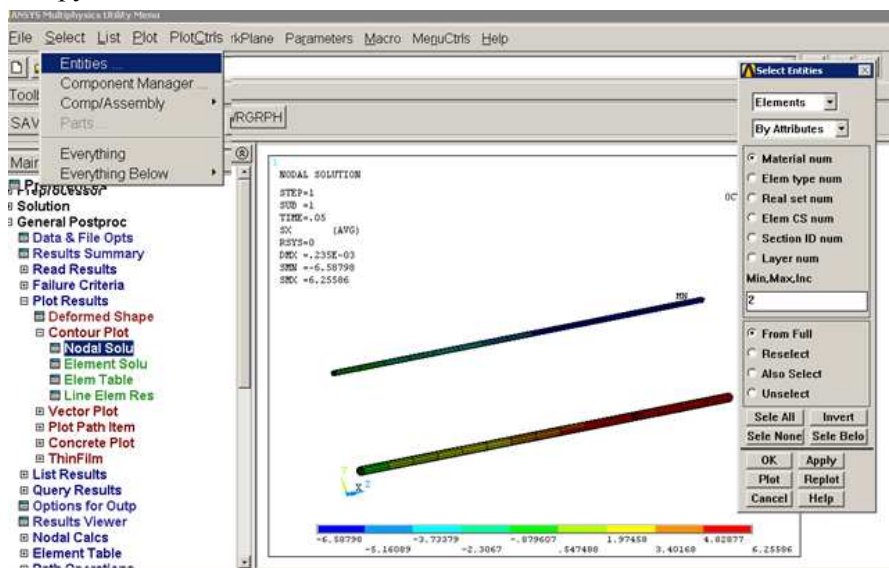


Рис. 46. Вибір та вивід на екран сталі (Material Num 2) арматури

Аналогічним чином можна вивести на екран лише матеріал бетону (рис. 47).

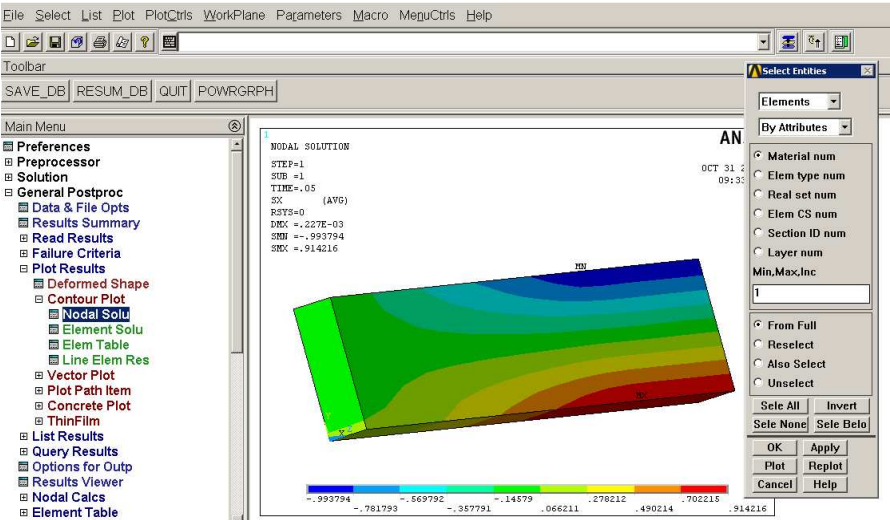


Рис. 47. Вибір та вивід на екран матеріалу (Material Num 1) бетону

Результати розрахунку зручно виводити покроково. Для вибору підкроку навантаження (вибір мишкою – by pick) та зчитування з жорсткого диска результатів обчислень використовується команда: General Postproc – Read Results – By Pick (рис. 48).

У вікні Results File Select можна вибрати необхідний підкрок і натиснути кнопку Read.

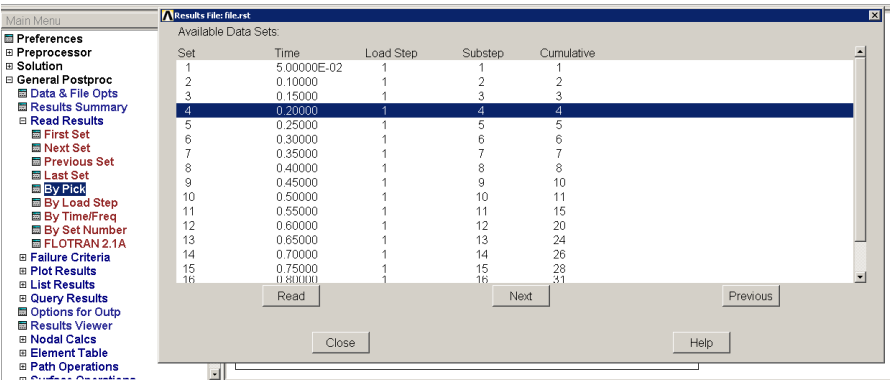


Рис. 48. Зчитування результатів розрахунку з жорсткого диску у вибраному підкроці

Для виводу необхідних результатів розрахунку в обраному підкроці можна використовувати команду: General Postproc – Plot Results – Nodal Solu.

У вікні Contour Nodal Solution Data (рис. 49) можна вибрати необхідні результати розрахунку НДС компонент балки, а також масштабний фактор:

- Auto Calculated – автоматично визначений програмою;
- True Scale – реальний масштаб;
- User Specified – вказується користувачем;
- Off – візуалізація деформування не відбуватиметься.

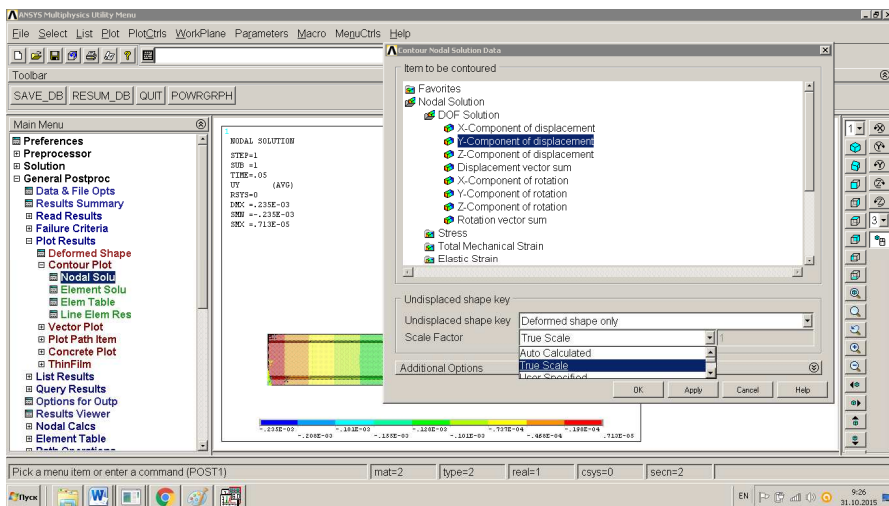


Рис. 49. Команда виводу та вікно вибору результатів розрахунку НДС

Результати та локалізацію розтріскування бетону можна відобразити з використанням команди (рис. 50) головного меню: General Postproc – Plot Results – Concrete Plot – Crack/Crush.

У даному випадку (рис. 50) на екрані відображено початок розтріскування бетону – 4-й підкрок навантаження (20% від максимального).

При виведенні на екран результатів розтріскування бетону варто вимкнути візуалізацію деформування Scale Factor – Off (рис. 49) і встановити повну (level 1) прозорість матеріалу бетону: PlotCtrls – Style – Translucency - By Value – Elements –Translucency level - 1.

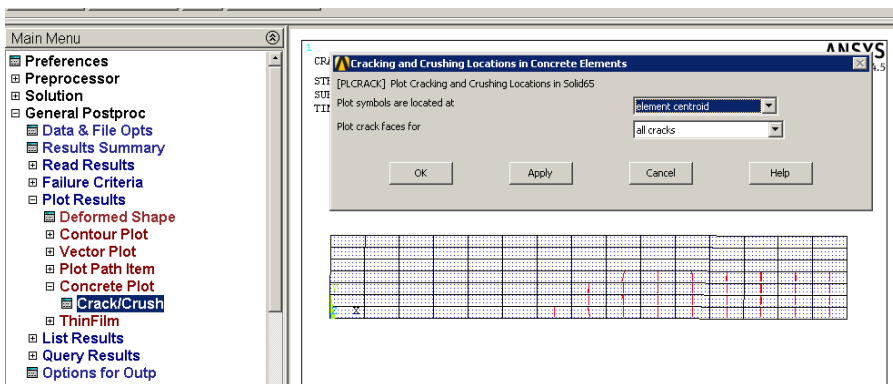


Рис. 50. Результати тріщиноутворення в бетоні на початковому етапі його розтріскування (4-й підкрок (див. рис. 45))

Результати розтріскування бетону на етапі втрати несучої здатності залізобетонної балки показані на рис. 51. Очевидно, що тріщини бетону трьох типів (first – I типу, second – II типу та third– III типу) заповнили увесь переріз балки.

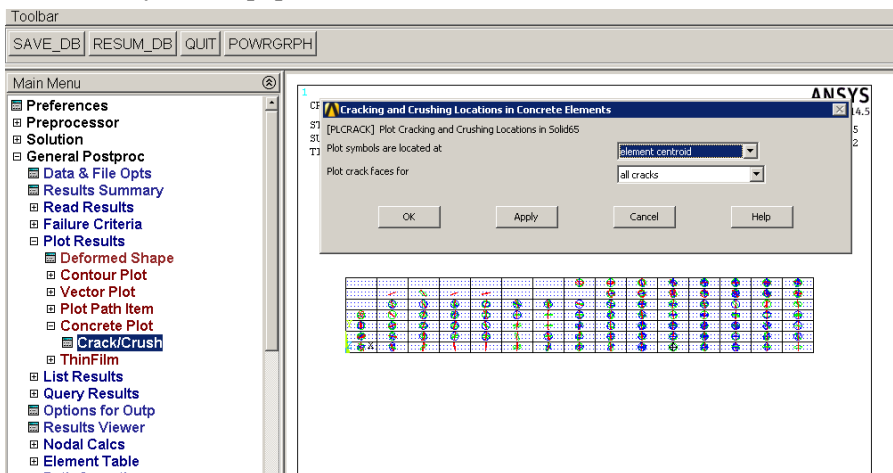


Рис. 51. Результати тріщиноутворення в бетоні при втраті несучої здатності балки (17-й підкрок (див. рис. 45))

На рис. 52. показано поля повздовжніх напружень (вздовж осі OX) в стержнях арматури при втраті несучої здатності балки, на 17-му підкроці навантаження. Максимальне напруження нижньої робочої арматури на цьому підкроці досягнуло значення 519,525 МПа, що

перевищує межу текучості матеріалу сталі (517,2 МПа). Тобто, руйнування балки супроводжується виникненням пластичних деформацій робочої арматури.

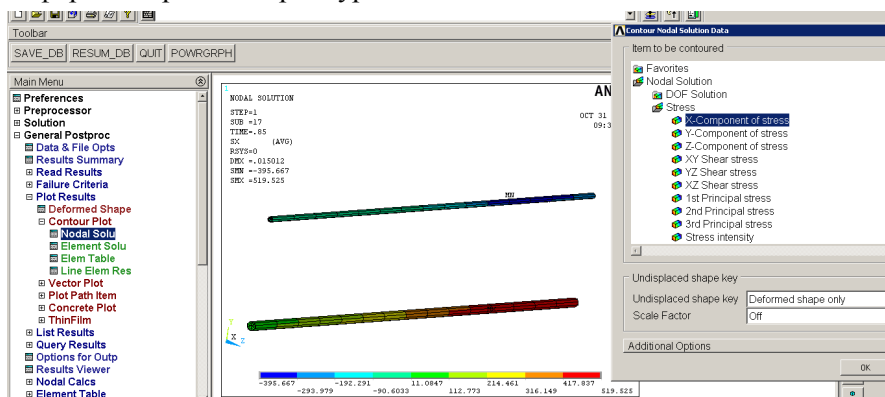


Рис. 52. Поля повздовжніх напружень (вздовж осі OX) в стержнях арматури при втраті несучої здатності балки (17-й підкрок навантаження)

У результаті аналізу НДС можна зробити висновок, що зусилля, при якому відбудеться втрата несучої здатності залізобетонної балки (17-й підкрок) становить 60000 Н (600 кг).

2.4 Зміст звіту

1. Титульна сторінка.
2. Зміст.
3. Завдання (згідно варіанту).
4. Значення нелінійних параметрів бетону при розтріскуванні, які використані при моделюванні. Розрахунок полілінійної ізотропної діаграми деформування бетону за умов стиску (згідно моделі Уільяма - Варнке) у т.ч. табличні значення.
5. Крива та опис пружно-пластичної білінійної діаграми деформування матеріалу арматури (білінійне кінематичне зміцнення).
6. Екранні копії геометричних параметрів січення змодельованої арматури (як на рис. 44).
7. Скінченноелементна модель залізобетонної балки (як на рис. 31).

8. Короткий опис навантаження вузлів та/чи поверхонь моделі у т.ч. її закріплення і умов симетрії.

9. Розрахунок НДС:

- крива залежності прогину балки від навантаження;
- крива залежності максимальних поздовжніх напружень робочої арматури у залежності від навантаження;
- висновок щодо навантажень початку розтріскування та втрати несучої здатності балки;
- екранна копія балки з тріщинами на початковому етапі розтріскування;
- екранна копія балки з тріщинами на етапі втрати несучої здатності балки.

10. Висновки.

Література

1. А.С. Кравчук. Лекции по ANSYS с примерами решения задач [Электронный ресурс]: курс лекций в 5 частях / Кравчук А.С., Смалюк А.Ф., Кравчук А.И. – Минск: БГУ, 2013. – 130 с.
2. D. Kachlakev. Finite Element Modelling of Reinforced Concrete Structures Strengthening with FRP Laminates / D. Kachlakev, T. Miller, S. Yim, K. Chansawat, T. Potisuk. Special Report SP316, Oregon Department Of Transportation, USA, May 2001. 113 p.
3. G. Murali. Flexural Strengthening Of Reinforced Concrete Beams Using Fibre Reinforced Polymer Laminate: A Review / Murali G., Pannirselvam N. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences Vol.6, No.11, November 2011, pp.41-47.
4. P. A. Ritchie, D. A. Thomas, L.W. Lu and G. M. Connelly, External Reinforcement of Concrete Beams Using Fiber Reinforced Plastics, ACI structural journal, Title no. 88-S52, July-August 1991. 88(4): pp. 490.
5. M. Arduini, A. D. Tommaso and A. Nannim, Brittle Failure in FRP Plate and Sheet Bonded Beams, ACI Structural Journal, July-August 1997. 94(4): pp. 363-370.
6. S. F. Brena, R. M. Bramblett, S. L. Wood and M.E. Kreger, Increasing Flexural Capacity of Reinforced Concrete Beams Using Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composites, ACI Structural Journal, January-February 2003. 100(6): pp. 827-830.
7. I. Saifullah. Experimental and Analytical Investigation of Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beam / I. Saifullah, M. Nasir-uz-Zaman, S.M.K. Uddin, M.A. Hossain, M.H. Rashid // International Journal of Engineering & Technology. - IJET-IJENS, 2011.-Vol 11.-№ 1.-p. 146-153.
8. Пиндус Ю.І. Скінченноелементне моделювання підсилення згинальних залізобетонних конструкцій вуглепластиковою стрічкою / Ю.І. Пиндус, О.П. Конончук // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. пр. – Рівне: НУВГП, 2014. – Вип. 29. – С. 621 – 629.
9. Пиндус Ю.І. Дослідження підсилених вуглецевим полотном згинальних залізобетонних конструкцій із застосуванням методу скінченних елементів / Ю.І. Пиндус, О.П. Конончук // Містобудування та територіальне планування: Наук.-техн. збірник – К., КНУБА, 2014. – Вип. 54. – С. 282 – 290.
10. ДБН В.2.6-98:2009 Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. – 71 с.

11.ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. – Київ: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2010.– 166 с.